

Sähkön kysyntäjouston toteuttaminen kotitalouksissa

Mikael Kauppinen

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 23.5.2016.

Työn valvoja ja ohjaaja:

Prof. Matti Lehtonen

Tekijä: Mikael Kauppinen		
Työn nimi: Sähkön kysyntäjouaston toteuttaminen kotitalouksissa		
Päivämäärä: 23.5.2016	Kieli: Suomi	Sivumäärä: 7+49
Sähkötekniikan ja automaation laitos		
Professori: Sähköjärjestelmät ja suurjännitetekniikka		
Työn valvoja ja ohjaaja: Prof. Matti Lehtonen		
<p>Suomen sähköjärjestelmä on siirtymässä aikakauteen, jolloin tehotasapainoa ei voida pitää yllä pelkästään rakentamalla lisää tuotantokapasiteettia, vaan myös sähkönkulutuksen on enenevässä määrin mukauduttava kulloinkin käytettävissä olevaan tehoon. Suurimmat sähkönkuluttajat ovat osallistuneet jo pidempään sähkön kysyntäjouastoon, missä kulutusta siirretään huipputunnilta halvemmalle tunnille. Haettaessa lisää reservejä kysyntäjouastoon joudutaankin nyt siirtymään pienemmille tehoportaille, eli kotitalouksien tasolle.</p> <p>Työn kirjallisuuskatsauksessa selvitettiin, miten paljon sähkölämmitystehoa kotitalouksilla on tarjottavana kysyntäjouastoon, ja että millaisia sähkölämmitysjärjestelmiä suomalaisissa kotitalouksissa on. Tutkimuksessa selvitettiin, millaisia keinoja on olemassa välittää ohjauskäskyjä kotitalouksien laitteistoille, ja millaisia kotitalouksien kysyntäjouaston mahdollistavia ohjausjärjestelmiä on olemassa tai suunnitteilla.</p> <p>Tutkimuksessa selvisi, että sähkön kysyntäjouaston tiedonsiirtoon parhaiten soveltuvia väyliä ovat Internet ja erilaiset radiotaajuiset yhteydet, ja että kotitalouksille on jo olemassa jonkin verran kysyntäjouaston mahdollistavia ohjausjärjestelmiä. Kuitenkin, ohjausjärjestelmien ollessa varhaisessa kehitysvaiheessa, eivät ne toteuta vielä kaikkia vaadittuja toimintoja, kuten kysyntäjouastoa termostaatin lämpötilan asettelulla.</p>		
Avainsanat: sähkön kysyntäjouasto, sähkölämmitys, älykäs sähköverkko		

Author: Mikael Kauppinen

Title: Electricity demand response in households

Date: 23.5.2016

Language: Finnish

Number of pages: 7+49

Department of Electrical Engineering and Automation

Professorship: Power systems and High Voltage Engineering

Supervisor: Prof. Matti Lehtonen

Advisor: Prof. Matti Lehtonen

The Finnish electrical system is coming to a point, where power balance can't be withheld only by building more power production. Instead the consumers of electricity must adapt more of their consumption according to available power. The biggest industrial electricity consumers have participated in electricity demand response for a while, which means transferring consumption of power from a peak hour to a cheaper hour. The search for more demand response reserves has progressed to a level of ever smaller consumption, meaning that household customers are sought for participation in demand response.

In literary review part of the thesis were found out, how much electrical heating capacity households might be able to offer to demand response, and what kind of electrical heating systems are installed in Finnish households. The research part aimed to find out, which are the suitable means to communicate with household equipment, and what kind of control systems exist or are planned for household demand response.

The research found out that the best suitable means of communication to households are through Internet and different radio frequency links. Results also included discovery of different working solutions for household demand response. However, as the equipment are mostly in an early maturation stage, they couldn't perform all the tasks required from them, such as participating in demand response by controlling the setpoint of a heater's thermostat.

Keywords: electricity demand response, electric heating, smart grid

Esipuhe

Tieni Suomen korkeakoulujärjestelmässä on ollut pitkä, eikä aina ole ollut itsestäänselvää, että lopulta valmistuisin. Tässä se nyt kuitenkin on, diplomityöni Aalto-yliopiston Sähkötekniikan korkeakouluun.

Mielenkiintoisesta aiheesta haluan kiittää professori Matti Lehtosta. Myös hänen kanssaan käydyt keskustelut diplomityön luonteesta ja muista asioista ovat autta-
neet minua monesti tämän työn varrella jäsentämään ajatuksiani ja tarkistamaan suuntaani.

Erityinen kiitos kuuluu myös kaikille haastattelemilleni yritysmaailman edustajille. He auttoivat minua laajentamaan työtäni alueille, jotka tuntuivat minusta aluksi vierailta.

Ilman opiskelutovereitani en olisi viihtynyt loppuun asti opintiellä. Siksi lukuisat kiitokset kaikille kavereilleni ja ystävilleni Aalto-yliopiston Sähköinsinöörillä ja Helsingin yliopiston Eteläsuomalaisessa osakunnassa. Kiitos rahallisesta tuesta kuuluu myös Eteläsuomalaisten ylioppilaiden säätiöille, jonka avokätinen tuki rohkaisi minua ylipäättään aloittamaan tämän prosessin.

Lisäksi kiitos kuuluu perheelleni ja läheisilleni, jotka ovat tukeneet minua monin tavoin yliopistopolkuni varrella.

Espoossa 23.5.2016

Mikael U. R. Kauppinen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Esipuhe	iv
Lyhenteet	vii
1 Johdanto	1
1.1 Tutkimuskysymykset	1
1.2 Työn rajaus ja tutkimuksen lähtökohdat	2
1.3 Lähdemateriaalin hankinta	2
1.4 Tutkimusmetodologia	3
1.5 Työn tavoite	3
2 Sähkön tuotanto ja kysyntäjousto	4
2.1 Sähköntuotannon näkymät Suomessa	4
2.2 Kysyntäjouston markkinapaikat	6
2.3 Kysyntäjousto Suomen teollisuudessa	9
2.4 Kotitalouksien kysyntäjoustopotentiaali	10
2.5 Yhteenveto	11
3 Kysyntäjouston tuotteistaminen	13
3.1 Kuormien ohjaustavat	13
3.2 Kiinteistöjen mallintaminen	16
3.3 Järjestelmästandardit	17
3.4 Kuluttajan aktivointi	18
3.5 Vaatimukset infrastruktuurille ja laitteistolle	19
3.6 Fingrid Datahub	21
3.7 Toteutetut kysyntäjoustoprojektit	21
3.7.1 Malvik Everk	21
3.7.2 Toimistorakennuksen jäähdytyksen ohjaus	22
3.7.3 Fingrid ja There Corporation	22
4 Ohjauskäskyjen välittäminen kuormille	24
4.1 Viestiverkon turvallisuus- ja riskinäkökohtia	24
4.2 AMI-järjestelmä	26
4.3 Ohjaus Internetin yli	26
4.4 Langaton viestiliikenne	27
4.4.1 DVB-televisiotaajuudet	27
4.4.2 LoRaWAN	28

5	Kotitalouksien älykkäät laitteet	30
5.1	Sähkölämmitys suomalaisissa kotitalouksissa	30
5.2	Kotiautomaatiojärjestelmät	31
5.2.1	KNX-protokolla	32
5.2.2	Modbus-protokolla	33
5.2.3	Z-Wave-protokolla	33
5.2.4	Case: Cozify	34
5.2.5	Case: ThereGate	35
5.3	Etäohjattavat termostaatit	36
5.3.1	Nest	37
5.3.2	Wiser Air	38
6	Tutkimuksen tulokset	40
6.1	Viestiverkot ohjauskäskyille	40
6.2	Sähkölämmityksen etäohjaus	41
7	Johtopäätökset	43
7.1	Suosituksat kysyntäjoustop edistämiseksi kotitalouksissa	43
7.2	Aiheita jatkotutkimukselle	44
7.3	Yhteenvento	45
	Viitteet	46

Lyhenteet

AMI	Advanced Metering Infrastructure
AMR	Automated Meter Reading, energiamittarin etäluenta
CEM	Consumer Energy Management, kuluttajan energianhallinta
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
CHP	Combined Heat and Power, lämmön ja sähkön yhteistuotanto
DAB	Digital Audio Broadcasting, digitaalinen äänilähetys
DVB-T2	Digital Video Broadcasting, Terrestrial ver. 2: maanjäätäinen yksisuuntainen digitaalitelevision lähetys
HEMS	Home Energy Management System, kodin energianhallintajärjestelmä
IE-direktiivi	Industrial Emissions -direktiivi, teollisuuden päästödirektiivi
IoT	Internet of Things, asioiden Internet
IP	Internet Protocol (Suite), Internet-protokolla
OSI	Open Systems Interconnection
RF	Radio Frequency, radiotaajuus
Sener	Sähköenergialiitto ry Sener
SLY	Suomen Sähkölaitosyhdistys ry (nyk. Sener)
VTT	Valtion teknillinen tutkimuslaitos

1 Johdanto

Suomen sähköntuotanto on käännekohdassa. Työ ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi vaatii hiilidioksidipäästöjä tuottavan energiajärjestelmän muuntamisen vähäpäästöiseen suuntaan. Tähän pyritään muun muassa lisäämällä uusiutuvien energialähteiden osuutta sähköntuotannossa, ja sulkemalla vanhoja hiilivoimaloita. Lähitulevaisuudessa sähköauton yleistyminen aiheuttaa osaltaan uusia paineita sekä sähköntuotannolle että jakelulle.

Nämä seikat johtavat siihen, että joitakin vuosikymmeniä jatkunut huolettoman sähkönkulutuksen aika on ohi. Myös kulutuksen on osaltaan vastattava tarjonnan uusiin haasteisiin. *Sähkönkulutuksen kysyntäjoustolla* tarkoitetaan ajoittaista sähkönkulutuksen siirtoa toiseen ajankohtaan, pois sähköntuotannon huippuajankohdista tai huippuhinnoista. Suurteollisuus on osallistunut kysyntäjoustoon jo pitkään, ja lähivuosina joustoa haetaan myös pienemmiltä kulutusportailta.

Kaikki kotitalouksien kuormat eivät sovi kysyntäjoustoon, mutta sähkölämmitteisten kotitalouksien ja vapaa-ajanasuntojen kuormat ovat yhteen koottuna merkittävän suuri tehoreservi. Kuormia kokoavaa tahoa kutsutaan *kysynnänjouston aggregaattoriksi*. Jotta kotitalouksien tarjoamaa joustovaraa voi hyödyntää, tulee päättää, miten kysyntäjousto teknisesti toteutetaan, ja millaisia kannustimia kotitalouskuluttajan aktiivisuudessa käytetään.

1.1 Tutkimuskysymykset

Tälle työlle on asetettu tavoitteeksi selvittää kotitalouksien mahdollisuuksia osallistua sähkönkulutuksen kysyntäjoustoon. Kysyntäjouston markkinanäkökulmia on jo tutkittu aiemmin, ja niitä käsitellään kirjallisuuskatsauksessa. Teknisesti kysymys jakautuu kahteen haaraan. Ensinnäkin työssä selvitetään, onko jo olemassa käyttövalmiina tapa välittää ohjauskäskyjä yksittäisille lämmityskuormille tunneittain tai jopa pienemmällä aikaskaalalla. Kun on selvitetty eri tiedonsiirtotapojen olemassaolo ja soveltuvuus ongelmaan, toisena kokonaisuutena selvitetään, millaisia ratkaisuja on olemassa tai ehkä suunnitteilla sähkölämmitysten ohjaukseen, ensisijaisesti termostaatin asetuslämpötilan säätämisen kautta ja toissijaisesti muilla tavoin.

Päätavoitteiden ohella työssä sivutaan myös lukuisia toissijaisia kysymyksiä. Tekniseltä kannalta on hyvä tietää hyödyt suoran ohjauksen toteuttamisesta hintasignaaleilla termostaateille. Eri valmistajat ovat voineet kehittää laitteilleen erilaisia ratkaisuja etäohjauksen toteuttamiseksi, joten toteutuskohtaiset erot ja tarve mahdolliselle standardointityölle ovat selvittämisen arvoisia asioita. Asumismukavuuden kannalta huonekohtainen kuormanohjaus olisi järkevää, joten kysyntäjouston aggregaattorin mahdollisuudet asiakkaan lämpötilojen huonekohtaiseen säätöön olisi hyvä tuntea.

Kaupalliselta kannalta etäohjattavien tai etäohjaukseen kykenevien termostaattien markkinalevinneisyys ja saatavuus ovat mielenkiintoisia seikkoja. Nämä voivat osaltaan myös vaikuttaa siihen, kenen aktiivisuudesta kotitalouksien kysyntäjouston edistäminen riippuu: onko kotitalouksille vielä ylipäättään tarjolla toteutettavia ratkaisuja kysyntäjoustoon osallistumiseksi, eli vaatiiko uusien tuotteiden kehittäminen

vielä merkittävääkin lisäpanosta, vai eikö kotitalouksilla ole riittäviä kannustimia kysyntäjoustoon osallistumiseksi.

1.2 Työn rajausta ja tutkimuksen lähtökohdat

Tutkimuksen alueeseen kuuluvat ensisijaisesti kotitalouksien sähköllä toimivat lämmityskuormat. Käytännössä tämä rajausta tarkoittaa tutkimuksen keskittymistä sähköpatterien, lattialämmityksen ja vastaavien sähkökäyttöisten lämmittimien, ja huone-termostaattien ympärille. Muita mielenkiintoisia lämmityskuormia voisivat olla lämminvesivaraajat, sähköuunit, saunat, autojen lämmittimet, kuivaushuoneet ja -rummut ja vastaavat. Näistä ainakin lämminvesivaraajat ovat jo osittain kaksiaikatariffin piirissä, joten niitä sivutaan kirjallisuuskatsauksessa. Muita kuormia ei tämän työn puitteissa ehditty käsittelemään.

Teollisuuden tai liikerakennusten kysyntäjoustoon soveltuvia kuormia on selvitetty jo eri diplomitoissa ja tutkimuksissa, joita käsitellään lyhyesti kirjallisuuskatsauksessa. Vaikka tutkimuksen tulokset voivatkin soveltua myös pienten liikekiinteistöjen lämmityksen ohjaukseen, ei liikekiinteistöihin perehtyminen varsinaisesti ole tämän tutkimuksen tavoitteena.

Aiemmat julkaisut kotitalouksien kysyntäjoustosta painottavat sähkönjakeluyritysten roolia, eikä vähiten siitä syystä, että heillä on jo lakisääteisen etämittaroinnin myötä kaksisuuntainen viestiväylä jokaiseen sähkönkulutuspisteeseen Suomessa. Tämän ratkaisun yksityiskohdat ja käyttökelpoisuus esitellään työn kirjallisuuskatsauksessa. Vaikka sähkönjakeluyrityksillä on aiemmin ollut merkittävä rooli uuden tekniikan edistäjänä esimerkiksi verkkokäskyohjauksen edistämiseksi, on tämä rooli tulevaisuudessa siirtymässä entistä vahvemmin sähköntuottajille tai muille kysyntäjouston aggregaattoreille. Tämän tutkimuksen lähtökohtana onkin, että sähkönjakeluyritys ei itse tavoittele kysyntäjouston lisäämistä, vaan toimii halutessaan tietoliikenteen osalta yhtenä mahdollisena palveluntarjoajana. Työssä myös haetaan vaihtoehtoja jakeluverkkojen omistamalle AMI-infrastruktuurille kysyntäjouston ohjauskäskyjen viestiväylänä.

Lähtökohtaisesti tässä tutkimuksessa kysyntäjoustoa tavoittelee siis sähkön myyjä tai kysyntäjouston aggregaattori. Tämä työ ei siis selvitä kysyntäjouston mahdollisia hyötyjä sähkönjakeluyhtiöille, muuten kuin tietoliikenneinfrastruktuurin tarjoajana.

1.3 Lähdemateriaalin hankinta

Kirjallisuustutkimuksen ohella työtä varten on kerätty sähkötarvikkeita valmistavien yritysten tuotteiden tietolehtisiä ja markkinointimateriaalia, ja muuta saatavilla ollutta materiaalia tuotteiden hyödyntämisestä kysyntäjoustossa.

Haastattelut eri yritysten yhteyshenkilöiden ja kehitysjohtajien kanssa tuovat myös paljon kaivattua lisäaineistoa tutkimusosuuteen.

1.4 Tutkimusmetodologia

Tutkimus on tehty huipulta pohjalle -lähestymistavalla, eli lähtemällä selvittämään koko sähköjärjestelmän tasolta kysyntäjouaston tarpeellisuutta, edeten aina aggregaattorin tasolta linkkikerroksen kautta yksittäisen kotitalouden laitteistoon asti. Tutkimuksen tekotapana on ollut materiaalin kerääminen termostaateista ja viestimenetelmistä, niiden järjestäminen kategorioittain oikein, ja yhteyksien löytäminen näiden välille. Yhteyksistä löytyvät myös mahdolliset tavat toteuttaa kysyntäjouastoa kotitalouksissa.

1.5 Työn tavoite

Työn lopputuloksena on tarkoitus näyttää, mitä eri osa-alueita pitää huomioida kotitalouksien kysyntäjouaston hyödyntämisestä suunnitellessa, ja mille näistä on jo olemassa valmis tekninen ratkaisu ja mitkä näistä vielä odottavat sellaista. Tulosten pohjalta muotoillaan suositukset kotitalouksien sähkönkulutuksen kysyntäjouaston edistämiseksi.

Koska aihe on vielä varsin uusi, ja varsinaista teknillis-taloudellista analyysiä kotitalouksien kysyntäjouaston toteuttamisesta löytyy vielä vähän, esitellään ennen työn loppua myös ehdotuksia jatkotutkimukselle alalta.

Tutkimuksen tulokset ovat tarkoitettu laajasti sovellettaviksi. Sähkönmyyjä voi kehittää esitetyistä ratkaisuista itselleen uuden tuotteen. Sähkömarkkinoille kysyntäjoustoaggregaattoriksi mielivä taho saa työstä lähtökohdat toiminnalleen. Tietoliikenneoperaattori, jollaiseksi työn puitteissa myös sähkönjakeluyritys alihankkijoineen voidaan mieltää, voi harkita sähkönmyyjälle tai aggregaattorille tehtävään soveltuvan tietoliikennetuotteen kehittämistä. Kotiautomaatiotuotteita tai sähkölämmitysratkaisuja valmistava taho voi soveltaa tuloksia uuden sukupolven tuotteeseen, jonka tarjoamia ratkaisuja kysyntäjouaston aggregaattori voi hyödyntää. Lisäksi työ voi tarjota näkökulmia kysyntäjoustojärjestelmän standardointityöhön, jotta koko laiteketju yksittäisestä termostaatista datakeskukseen asti saadaan toimimaan yhdessä.

Työ voi myös osoittautua hyödylliseksi sähkösuunnittelijoille, jotka työskentelevät älykkäiden talojen kanssa. Lisäksi työstä voi saada lähtökohdat yhteisille suunnitteluohjeille taloista, jotka voivat osallistua kysyntäjouastoon.

2 Sähkön tuotanto ja kysyntäjousto

Ilmastomuutoksen hillintä on yksi tärkeimpiä ihmiskunnan ponnistuksia tällä vuosisadalla. Hiileen pohjautuvasta energiataloudesta pyritään pois. Hiilidioksidipäästöistä tehdään kannattamattoman kalliita, jotta uusiutuvat energianlähteet olisivat varteenotettavampi vaihtoehto. Samaan aikaan sähkönkulutus ei osoita vähenemisen merkkejä.

Sähköntuotantoon Suomessa liittyy myös kansallisia erityispiirteitä. Suomessa on neljä sähköntuotannossa käytettyä ydinreaktoria, ja lisäksi kaksi uutta on rakenteilla. Vanhimmat reaktorit poistuvat käytöstä jo 2030-luvulla. Lauhdevoimakapasiteettia on poistunut suunniteltua enemmän kuluvan taantuman aikana. Uusiutuvista energianlähteistä tuulivoimalle kaavaillaan merkittävää lisäystä, ja joitakin aurinkovoimalaprojekteja on tiedossa myös. Nämä muutokset Suomen sähköntuotannossa tarkoittavat jo lähitulevaisuudessa sitä, että myös sähkönkulutuksen täytyy mukautua kulloinkin käytettävissä oleviin tehoresursseihin.

Sähkönkulutuksen kysyntäjousto tarkoittaa kulutuksen ajallista siirtämistä kalliimman tehon tunnilta halvempiin ajankohtiin.[1, s. 17] Suuritehoiset teollisuuden tuotantoprosessit ovat osallistuneet kysyntäjoustoan jo pitkään. Seuraavaksi haetaan lisää säätöpotentiaalia kotitalouksista. Parhaimmillaan sähkölämmittäjien osallistuminen kysyntäjoustoan tuo uuden, merkittävän resurssin tehotasapainon hallintaan.

Luvussa käsitellään myös lyhyesti sähköenergian markkinapaikat ja hinnanmuodostus niillä. Kysyntäjoustoille on olemassa useita soveltuvia markkinoita, ja samaa kysyntäjoustoreserviä voi tarjota eri päivinä eri markkinoille. Optimaalisen tuoton saamiseen liittyy tällöin haasteita, joita sivutaan kappaleessa 2.4.

2.1 Sähköntuotannon näkymät Suomessa

Sähkönkulutus vaihtelee ajallisesti, eikä sähköä voida varastoida suuria määriä. Tämän takia sähköjärjestelmässä tuotannon ja kulutuksen on oltava joka hetki tasapainossa. Tuotantoon tarvittavaa kapasiteettia pitää olla käytettävissä huipputehon vaatima määrä. Lisäksi vikatilanteisiin ja ennuste-epävarmuuteen varautuminen edellyttää reservitehon olemassaoloa.[2, s. 29]

Sähkönkulutus Suomessa oli vuonna 2007 90,3 TWh. Energiateollisuus ry ja Elinkeinoelämän keskusliitto ennustivat samana vuonna, että kulutus kasvaa vuoteen 2020 mennessä 106,5 TWh:iin ja 2030 mennessä 114,6 TWh:iin. Suhteellisesti kehityksen suuruus on noin prosentin vuodessa. Vuonna 2008 alkanut lama tosin heikentää sähkönkulutuksen kasvua. Yhdessä käytöstä poistuvan tuotannon kanssa nämä kasvunäkymät tarkoittavat, että uutta kapasiteettia tarvitaan vuoteen 2020 mennessä 5500 MW ja vuoteen 2030 mennessä 8400 MW. Vuoden 2007 huipputehoon suhteutettuna 5500 MW tarkoittaa yli 30 %:n osuutta.[2, s. 24–27]

Teollisuus on perinteisesti kuluttanut suurimman osan Suomen sähköntuotannosta, mutta yksityisen kulutuksen ja palveluiden osuus kulutetusta sähköstä on kasvussa. Myös sähköautojen yleistymisen aiheuttaa haasteita sähköntuotantoon ja -jakeluun: jos kaikki Suomen 2,5 miljoonaa ajoneuvoa muuttuisivat sähkökäyttöisiksi, voisi sähkönkulutus kasvaa jopa 7,5 TWh[3, s. 94–95].

Taulukko 1: Suomen sähköntuotantokapasiteetti vuonna 2012 ja arvioidut muutokset vuoteen 2030 mennessä.[3, s. 50]

	<i>Tilanne 2012</i>		<i>Arvioitu 2030</i>	
Tuotanto- muoto	perusvoima, MW	säätövoima, MW	perusvoima, MW	säätövoima, MW
Ydinvoima	2660	–	4000–6000	–
Teollisuus-CHP	3300	500	vähenee hieman	ennallaan
Kaukolämpö- CHP	4400	1000–3000	vähenee hieman	ennallaan
Lauhde	–	3300	–	vähenee
Vesivoima	3100	2000	3300–3370	2200–2270
Kaasuturbiinit	–	780+300	–	kasvaa?
Tuulivoima	220	–	4000	–
Venäjän tuonti	1000	–	loppuu?	–
Ruotsin tuonti	–	1500	–	vähenee?

Vastauksena ennustettuun sähkön kysynnän kasvuun on Suomessa tehty kaksikin päätöstä lisäydinvoiman rakentamisesta tällä vuosituhanella. Olkiluodon kolmas reaktoriyksikkö aloittaa säännöllisen sähköntuotannon nykyarvion mukaan vuonna 2018, ja Hanhikivi 1 on valmiina kaupalliseen käyttöön vuonna 2024. Ydinvoimaa ei käytetä säätövoimana, sillä isoilla laitoksilla tehon muuttaminen on varsin hidasta. Myös laitosten korkeat investointikustannukset ja pienet käyttökustannukset puoltavat mahdollisimman suurta sähköntuotantoa[3, s. 32], eikä asiassa tehdä poikkeusta uusienkaan yksiköiden kohdalla. Myös turvallisuustekniset käyttöehdot estävät nykyisten laitosten jatkuvan osallistumisen säätöön.[3, s. 33–34]

Yksittäisen ydinvoimalan sähköteho on moninkertaisesti suurempi kuin keskimääräisen hiililauhdelaituksen sähköteho. Jos ydinvoimalaitos pitää vikatilanteessa irrottaa valtakunnan verkosta, irtaantuu verkosta kerralla paljon tehoa ja pyörivää massaa, eikä näiden korvaaminen ole erityisen helppoa. Uusia laitoksia suunniteltaessa tähänkin pitää varautua.

Suomessa tavoitellaan vuoteen 2020 mennessä 6 TWh:n tuulivoimatuotantoa, ja vuoteen 2025 mennessä 9 TWh:ia. 2500 tunnin huipunkäyttöajalla nämä vastaavat tehoja 2400 MW ja 3600 MW. Jos näille tehoille arvioidaan vaihtelut 6 ja 24 tunnin sisällä toteutuneen tuulivoimatuotannon vaihtelun mukaan, vaihtelee tuotanto kuuden tunnin kuluessa korkeintaan 44 % ja 24 tunnin kuluessa korkeintaan 72 % tuulivoimakapasiteetista, kuten taulukko 2 osoittaa.[3, s. 59–61]

Taulukko 2: Tuulivoimatuotannon maksimaalinen vaihtelu esimerkkiviikkojen aikana ja suuremmalle tuotantokapasiteetille skaalattu vaihtelu [3, s. 61]

Tuulivoimakapasiteetti, MW	212	2400	3600	4000
Tuotannon maksimaalinen vaihtelu 6 h:n sisällä, MW	93	1056	1584	1760
Tuotannon maksimaalinen vaihtelu 24 h:n sisällä, MW	153	1728	2592	2880

Fingrid olettaa omassa arviossaan säätövoiman tarpeesta, että tuulivoiman tunnin sisäinen vaihtelu voi olla korkeintaan 16 % tuulivoimakapasiteetista. Taulukon 2 luvut eivät välttämättä kuvaa keskimääräistä tilannetta tai harvoin esiintyviä ääritilanteita, mutta niihin on kuitenkin toimitusvarmuuden puitteissa varauduttava.[3, s. 61]

Tuulivoima oletettavasti lisää sähkön hinnan vaihteluita. Tuulisella säällä sähkön tukkumarkkinahinta laskee, ja muuttuvilta tuotantokustannuksiltaan kalleimman tuotantomuodon, käytännössä lauhdetuotannon, käyttö vähenee. Toisaalta vähätuulisina aikoina sähkön tukkumarkkinahinta nousee: kun tuulisähköä ei ole saatavissa, kysyntä korvaavalle kapasiteetille on suurta. Koska korvaavaa tuotantoa eli lauhdetuotantoa tarvitaan entistä harvemmin, on sen käyttö kalliimpaa tuntia kohden, sillä sähköntuottajat tarvitsevat riittävät tulot, jotta harvemmin käytettyä kapasiteettia kannattaa ylläpitää ja siihen kannattaa investoida. Kesäaikaan korostuu myös vesivoiman käyttö säätövoimana, ja ruotsalaisten arvioiden mukaan tuulivoiman lisärakentaminen voi johtaa vesivoiman ohijuoksutuksiin tuotannon rajoittamiseksi.[3, s. 68–70]

Samaan aikaan hiilidioksidipäästöjä ollaan rajoittamassa, eikä perinteisten hiilellä käytettävien lauhdevoimalaitosten käyttö ole yhtä kannattavaa kuin ennen. Lauhdetuotantokapasiteetin tuotantoarvoa uhkaa myös paljon kohuttu ”rikkidirektiivi” (IE-direktiivi, Industrial Emissions), joka edellyttää parhaan käyttökelpoisen tekniikan mukaista päästöjen rajoittamista myös vanhoilta laitoksilta; käytännössä joko uusia rikinpoistolaitoksia vanhoille voimaloille, tai tuotannon tuntimäärien rajoittamista.[3, s. 23] Tämä yhdistettynä aiemmin esiintulleeseen käytön rajoittamiseen vaihtelevan tuotannon takia saa monet lauhdelaitosten haltijat harkitsemaan, onko kannattavaa investoida päästörajojen saavuttamiseksi, vai tulisiko laitos jopa sulkea kokonaan pelkän käytön rajoittamisen sijaan. Ensimmäiset laitosten sulkemiset Suomessa on uutisoitu jo vuonna 2015, ja Energiamarkkinaviraston vuosiraportin[4, s. 28] mukaan vuoden 2015 marraskuun loppuun mennessä Suomessa poistui tuotannosta kokonaan 883 MW lauhdelaitoksia.

Tehotasapainon hallinta pelkästään sähkön tuotantoa lisäämällä ei ole kovin yksinkertaista nykytilanteessa. Tässä valossa olisikin järkevää, että osa sähkön kulutuksesta seuraisi tuotantoa, ja että tehotasapainon hallitsemiseksi järjestelmä sisältäisi nykyistä enemmän kysynnän joustoa. Kysyntäjousto auttaisi osaltaan ylläpitämään energiajärjestelmän luotettavuutta, ja lisäksi mahdollistaisi uusiutuvan tuotannon voimakkaan lisärakentamisen.[1, s. 16]

Kysyntäjoustopon hyödyntäminen tehotasapainon säädössä ja reservikapasiteettina vähentää tarvetta uudelle tuotantokapasiteetille, jota hyödynnettäisiin säätövoimana ja reservinä. Tuotantokapasiteettiin investoimisen sijaan Fingrid voisi maksaa korkeampia korvauksia kysyntäjoustopon aggregaattoreille (ks. kappale 2.2), jolloin kysyntäjousto tulisi kannattavamaksi.[5, s. 38]

2.2 Kysyntäjoustopon markkinapaikat

Suomi on ollut vuodesta 1995 osallisena yhteispohjoismaisilla sähkömarkkinoilla, joilla johtavana ajatuksena on se, että sähkö on normaali kauppatavara, jonka tuottamisen, hinnoittelun ja myynnin on oltava vapaasti markkinoiden määrättävissä.

Jotta tämä olisi mahdollista, on myös sähkökaupan vertikaalinen integraatio purettu, eli sähköenergian tuottaja ei voi olla myös sähkön siirtäjä ja jakelija. Näin siirtomaksuilla ei voida subventoida sähkön hintaa, eikä vääristää verkkoa omistamattomien tuottajien kilpailuasemaa. Pohjoismaisen markkinajärjestelmän luonnilla pyrittiin alentamaan sähkön hintaa.[2, s. 47]

Pohjoismaiden fyysisen sähkön markkinapaikka on Nord Pool, jonka jäseniä ovat sähköntuottajat, sähköyhtiöt ja teollisuusyritykset. Jäsenyys pörssissä edellyttää vakuuksien antamista, joilla katetaan jäsenen velvollisuuksien laiminlyönnistä mahdollisesti aiheutuneet tappiot. Nord Poolissa on kaksi fyysisen sähkön markkinaa, Elbas päivänsisäiselle markkinalle ja Elspot vuorokausimarkkinalle. Elspot-markkinalla määräytyvä hinta on sähkön markkinahinta Pohjoismaissa. Elspotin systeemihinta muodostetaan tunneittain seuraavan vuorokauden kulutukselle. Vuorokauden kunkin tunnin osto- ja myyntitarjoukset esitetään hinnan funktiona, ja systeemihinta on saatujen käyrien leikkauspisteessä, jossa koko markkina-alueen osto ja myynti ovat tasapainossa. Elbas-markkinalla puolestaan käydään kauppaa saman päivän tunneista siten, että kunkin tunnin Elbas-hinta määräytyy 60 minuuttia ennen kyseisen tunnin alkamista. Näin toimimalla tasapainotetaan kunkin päivän sähkötase. Tarjousalueiden väliset siirtokapasiteettirajoitteet johtavat erillisten hinta-alueiden syntyyn.[2, s. 48–49]

Valtakunnallista hetkellistä tehotasapainoa ylläpitää Suomessa Fingrid Oyj, osana Energiamarkkinaviraston määräämää järjestelmävastuuta. Järjestelmävastuu tarkoittaa sähköjärjestelmän ylläpitoa ja käyttöä teknisesti tarkoituksenmukaisella tavalla. Jännitteen ja taajuuden ylläpito verkossa, sekä taajuudensäädön ja taajuusohjatun häiriöreservin hankinta ovat myös osa tätä vastuuta. Fingridillä ei ole omaa säätökapasiteettia, joten se ylläpitää kansallisia säätösähkömarkkinoita.[2, s. 60] Nämä markkinat, Fingridin taajuusreservit, Nord Poolin markkinat ja Energiamarkkinaviraston tehoreservi on koottu yhteen kuvaan 1. Nämä ovat myös kaikki markkinapaikat, joille kysyntäjousto soveltuu.

Työtä kirjoitettaessa taulukossa mainitun FRR-A -markkinan ylläpito on keskeytetty, koska pohjoismaisten markkinoiden kehittäminen ei ole edennyt aikataulussa.[7]

Suomessa sijaitsevaa, taajuusohjattuihin reserveihin soveltuvaa kapasiteettia voi tarjota Fingridin vuosi- tai tuntimarkkinoille. Vuosimarkkinoiden tarjouskilpailu järjestetään kerran vuodessa syksyisin, eikä markkinalle pääse mukaan kesken sopimuskautta. Reservisuunnitelman määrän mukainen kapasiteetti ostetaan täysimääräisesti vuosimarkkinalla, ja kunkin päivän reservisuunnitelma on jätettävä edellisenä päivänä kello 18 mennessä. Vuosimarkkinalla toimiva on velvoitettu ylläpitämään myymäänsä reserviä vapaan kapasiteetin puitteissa, ja kiinteä hinta on voimassa koko vuoden kalleimman markkinalle hyväksytyn tarjouksen mukaan. Sen sijaan tuntimarkkinoille osallistuminen edellyttää sopimuksen tekemistä Fingridin kanssa mihin tahansa aikaan vuodesta. Tarjoukset tuntimarkkinalle on jätettävä edellisenä päivänä kello 18.30 mennessä, ja tarvittava määrä reserviä aktivoidaan halvimmasta tarjouksesta lähtien. Tuntimarkkinalla tarjottava reservi voi myös vaihdella päivästä toiseen, ja korvaus käytetystä reservistä määräytyy kullekin tunnille erikseen kalleimman käytetyn tarjouksen mukaan.[8]

Käytännössä taajuusohjattuun reserviin tarjotun kuorman aktivointi etenee siten,

Tuote	Lyhenne	Sopimustyyppi	Minimi- tarjouskoko	Aktivoituminen	Aktivoituu	Korvaustaso 2016*
Taajuusohjattu käyttöreservi	FCR-N	Vuosi- ja tuntimarkkinat	0,1 MW	Lineaarisesti välillä 50,1 - 49,9 Hz, 0,1 Hz muutos 100 % 3 min	Jatkuvasti	17,42 €/MW,h (vuosi-markkinat) + energiahinta nettoenergiasta
Taajuusohjattu häiriöreservi	FCR-D	Vuosi- ja tuntimarkkinat	1 MW	Voimalaitokset: lineaarisesti välillä 49,9 - 49,5 Hz, kun f alle 49,5 Hz 50 % 5 s ja 100 % 30 s Relekytketyt kuormat: vaihtoehtoisesti 49,7 Hz 5s TAI 49,6 Hz 3s TAI 49,5 Hz 1 s	Useita kertoja vuorokaudessa Muutaman kerran vuodessa	4,5 €/MW,h (vuosi-markkinat)
Automaattinen taajuudenhallinta-reservi	FRR-A	Tuntimarkkinat	5 MW	FG:n lähettämän tehonpyyntisignaalin mukaisesti, 100 % 2 min	Useita kertoja vuorokaudessa	Kapasiteettikorv aus pay as bid periaatteella + energiahinta
Säätösähkö-markkinat	FRR-M	Tuntimarkkinat	10 MW	FG aktivoi tarjouksia hintajärjestyksessä, 100 % 15 min	Tarjouksen ja säätötarpeen mukaisesti	Markkinahinta
Elspot **)		Tuntimarkkinat	0,1 MW	12 h	-	Markkinahinta
Elbas **)		Tuntimarkkinat	0,1 MW	1 h	-	Markkinahinta
Tehoreservi ***)		Pitkäaikainen	10 MW	15 min	Harvoin	EV:n hankintakilpailun mukaisesti

Kuva 1: Kysyntäjoustolle soveltuvat markkinapaikat, aktivointien määrät, korvaus-
tasot sekä tekniset vaatimukset.[6]

että Fingrid lähettää reservinhaltijalle sähköisesti tiedon hyväksytyistä tarjouksista edellisenä päivänä kello 22, ja sen jälkeen on reservinhaltijan vastuulla kytkeä näin aktivoiduilta tunneilta kuormaa pois. Käytännössä verkon taajuutta on mitattu käyttöpaikkakohtaisesti, eli kuorman tulee reagoida autonomisesti taajuuden alenemiseen.[9]

On huomattava, että sähköjakeluyritys ei voi myydä kysyntäjoustoa millään mainituista markkinoista, sillä sähköjakelija ei saa osallistua sähköenergian markkinoille. Lisäksi jos sähköjakelija harjoittaisi kysyntäjoustoa jakeluverkon toiminnan parantamiseen, esimerkiksi jännitteensäädön kautta, häiritsisi se markkinaehtoista kysyntäjoustoa.[10, s. 13]

Taulukon 1 tietojen valossa yksittäinen teollisuuslaitos voi siis osallistua itsenäisesti näille markkinoille, mutta yksittäinen kotitalous ei näin voi tehdä. Yksittäisen kotitalouden tarjottavissa oleva teho on liian pieni, ja harvalla kotitaloudella on varaa mahdollisiin jäsenmaksuihin. Jos sen sijaan jokin markkinataho hallitsee useamman kotitalouden kuormia, tilanne muuttuu.

Kuvatunlaista tehoa kokoavaa tahoja kutsutaan *aggregaattoriksi*, ja aggregaattori voi koota kuormien lisäksi muitakin hajautettuja resursseja, kuten kotitalouksien pientuotantoa. Aggregaattorina voi toimia olemassaoleva sähköntuottaja tai vaikka kokonaan uusi, hajautettujen resurssien kokoamiseen muodostettu organisaatio, joskin jälkimmäisen kohdalla tasevastuu tulee selvittää.[10, s. 10, 13]

2.3 Kysyntäjousto Suomen teollisuudessa

Suomessa on kolme sähköä kuluttavaa ryhmää, jotka muodostavat merkittävän potentiaalin kysyntäjoustolle: suurteollisuus, pien- ja keskiuuri teollisuus, sekä sähkölämmittäjät.[3, s. 47] Taulukkoon 3 on koottu VTT:n vuonna 2005 selvittämät kysyntäjoustopotentiaalit Suomen suurimpien teollisuudenalojen kapasiteetista. Metsäteollisuus kokonaisuutena, ja tästä ryhmästä erityisesti massa- ja paperiteollisuus kuluttavat teollisuudesta eniten sähköä. On kuitenkin huomattava, että vuodesta 2005 taulukon tiedot metsäteollisuuden osalta ovat muuttuneet paperiteollisuuden kohtaaman rakennemuutoksen myötä.

Taulukko 3: Suurteollisuuden tarjottavissa oleva kysyntäjoustopotentiaali VTT:n vuoden 2005 kartoituksen mukaan.[11]

Toimiala	Osuus kokonaiskulutuksesta, %	Kysyntäjoustopotentiaali, MW	Tarjottavissa sähkömarkkinoille, MW
Massa- ja paperiteollisuus	28,4	790	464
Metallien jalostus	5,4	410	260
Peruskemikaalien valmistus	4,6	359	161

Suurteollisuus osallistuukin jo Suomessa kysyntäjoustoon, ja sopimukset tehdään suoraan Fingridin kanssa. Nord Poolin Elspot- ja Elbas-markkinoilla kysyntäjoustoa toteutetaan myymällä sähköä, ja lisäksi Elspot-markkinalla on tuote erityisesti teollisuuden irtikytkettäviä kuormia varten. Kaupankäynti Nord Poolissa on maksullista, jonka takia kysyntäjoustojen toteuttajat ovat vähintään keskiuuresta teollisuudesta. Julkisia lukuja kysyntäjouston käytöstä ei ole, sillä Elspot-markkinoille tehdyt tarjoukset ovat luottamuksellisia. Talvella 2009–2010 sähkön hintapiikkien aikana kysyntäjouston on arveltu olevan 400–500 MW tai enemmän.[3, s. 47–48]

Elspot-markkinoiden maksullisuuden ja kuormien pienuuden takia pien- ja keskiuuren teollisuuden osallistuminen kysyntäjoustoon on toistaiseksi ollut vähäistä. Kuitenkin, osallistuminen kysyntäjoustoon on pk-yrityksillekin jo teknisesti mahdollista etäluettavien sähkönkulutusmittarien tuntikohtaisen kulutusmittauksen ansiosta. Helpotusta toteutukseen tuo myös se, että pienemmät sähkönkäyttäjät hankkivat sähkönsä palveluntarjoajien avulla, jolloin kysyntäjoustoa voi toteuttaa vastaisuudessa sama palveluntarjoaja.[3, s. 48]

Myös uutta teollisuuden kysyntäjoustopotentiaalia on hiljan selvitetty kyselytutkimuksella Jokiniemen diplomityössä[5]. Haastattelutuloksista selviää, että elintarviketeollisuuden kylmälaitokset ja lämpöpumput, yritysten varavoimakoneet, jätevedenpuhdistamoiden kompressorit ja pumput, vesitornien pumput, ja kiinteistöjen lämmitys- ja jäähdytyslaitteet ovat potentiaalisimmin hyödynnettävissä kysyntäjoustossa. Suurin osa näistä kuormista on kuitenkin liian pieniä, jotta yrityksen olisi kannattavaa tarjota näitä itse suoraan sähkön markkinapaikoille. Jos jokin kysyntäjouston aggregaattori huolehtii yksittäisten kuormien kokoamisesta ja tarjoamisesta

markkinoilla, päästään merkittävään säätöpotentiaaliin. Odotettavissa onkin, että lisää pientä säädettävää potentiaalia olisi löydettävissä teollisuudesta ja yrityksistä, mutta sen hyödyntäminen jää aggregaattorin harteille.

2.4 Kotitalouksien kysyntäjoustopotentiaali

Suomessa on arviolta 6500 MW tehoa asennettuna huonetilojen sähkölämmitystä varten pientaloissa, rivitaloissa ja loma-asunnoissa. Tämä teho on harvoin kokonaan käytössä, sillä huonetilojen lämmitysteho riippuu ulkoilman lämpötilasta. Arviolta vain 40–50 % tästä tehosta onkin kytkeytyneenä suurimman osan lämmityskautta.[1, s. 92–93]

ÅF-Consultin raportin laskelma päättyy hieman matalampaan kokonaispotentiaaliin, johtuen ennen kaikkea siitä, ettei laskelma huomioi loma-asuntoja. Raportissa arvioidaan, että Suomessa on vakinaisia sähkölämmitettyjä asuntoja noin 600.000, joista kunkin kysyntäjoustopotentiaaliksi on arvioitu 1–2 kW. Tällöin koko potentiaali olisi noin 600–1200 MW. Muiden kuin sähkölämmitteisten kotitalouksien kysyntäjoustopotentiaali vaikuttaa raportin mukaan olevan liian pientä, jotta sitä voisi laajamittaisesti hyödyntää. Sähkönkäytöltään pienimpien kotitalousasiakkaiden hyvin pienet ohjattavissa olevat kuormat eivät muodosta edes suuremmiksi kokonaisuuksiksi kerättyinä selkeästi hallittavissa olevaa joustopotentiaalia.[3, s. 84]

Energiateollisuuden DR-poolin loppuraporttia[1] varten tehtiin mallinnus, jonka tarkoituksena on havainnollistaa, miten paljon sähkölämmitteisten kotitalouksien kuormanohjauksella on mahdollista säästää rahaa. Mallinnuksen keskeisimmät tulokset on esitetty taulukossa 4. Tuloksien mukaan pelkästään Elspot-markkinan hintaan perustuvalla ohjauksella saavutettava teoreettinen säästö on vaatimaton. Suurin säästöpotentiaali tämän simulaation perusteella olisi saavutettavissa, kun tarjotaan sähkölämmityskuormaa taajuusohjatuksi häiriöreserviksi. Tosin mallinnuksen luvuista on huomautettava, että 1200 ohjausta vuodessa tarkoittaa keskimäärin yli kolmea ohjausta päivässä, kun käytännössä taajuusohjattua häiriöreserviä tarvitaan paljon harvemmin. Raportista jää epäselväksi, tarkoittaako 1200 ohjauskertaa vuodessa ennemminkin 1200:ta mallinnuksen mukaan mahdollisesti hyväksyttyä tarjousta. Tämä epäselvyys herättää kysymyksiä mallinnuksen tulosten käyttöarvosta.

Raportissa kuitenkin huomautetaan, että taulukon 4 tulokset ovat teoreettisia arvoja, joiden saavuttamiseen liittyy käytännön haasteita. Tuottopotentiaaleissa ei ole otettu myöskään huomioon toteutuskustannuksia. Toisaalta laskelmien lähtöoletukset ovat väljät: ohjauksen kestoksi on aina oletettu tunti, ja uudelleenohjaus on estetty *jälkihuipun* (ks. kappale 3.1) ja sitä seuraavan tunnin ajan. Jos nämä tekijät voitaisiin optimoida paremmin, mallin tuottopotentiaali olisi paljon suurempi.[1, s. 72–73]

Helpointa laskennallisen potentiaalin saavuttaminen on Elspot-markkinoiden kohdalla, sillä tulevan vuorokauden hinnat julkaistaan jo käyttötuntia edeltävänä päivänä kello 14 Suomen aikaa. Muiden markkinoiden hinnat tiedetään vasta toimitustunnin jälkeen, joten ohjausten ajoittaminen optimaalisesti vaatii sekä kulutuksen että hintojen ennustamista. Pahimmassa tapauksessa huonosti ajoitettu ohjaus voi tuottaa tappiota, jos ohjauksen jälkeen ostettavan kompensoivan energian kustannus on suurempi kuin ohjauksesta saatu tuotto. Perusedellys taloudellisesti kannattavalle

Taulukko 4: Suoran sähkölämmityksen ja käyttöveden kuormitusryhmän simuloitujen kuormanohjausten laskennallinen säästöpotentiaali 1.1.-31.12.2011 eri markkinoilla (1388 asiakasta)[1, s. 70, mukaillen]

	Elspot- markkina	Tasehallinta	Säätösähkö, ylössäätö	Taajuusohjattu häiriöreservi, tuntimarkkina
Säästöpotentiaali yhteensä, €	3 488	11 702	23 499	59 998
Ohjaukertoja, kpl	1 232	1 607	1 280	1 204
Tuotto/ohjaus, €	2,8	7,3	18,4	49,8
Tuotto/ohjaus, max., €	45	524	1 502	1 337
Tuotto/asiakas, €	2,5	8,4	16,9	43,2

kuormanohjauksen toteutukselle on ennusteisiin liittyvän epävarmuuden huomioiminen tarjousstrategian ja riskinhallintamenetelmien avulla.[1, s. 72–73]

2.5 Yhteenveto

Sähkönkulutus Suomessa ei ole kääntymässä laskuun lähiaikoina, ja samanaikaiset muutokset Suomen sähköntuotannossa tekevät tehotasapainon ylläpidosta haastavampaa. Kiristyvät hiilidioksidipäästövaatimukset ovat johtamassa vanhojen lauhdevoimalaitosten alasajoon, jolloin nopeasti saatavilla oleva lisätuotantokapasiteetti heikkenee. Suomeen valmistuvat kaksi uutta ydinreaktoria vaativat toisaalta lisää säätökapasiteettia vikatilanteiden varalle. Myös tavoite tuulivoiman lisäämisestä sähköntuotannosta lisää saatavilla olevan sähkötehon vaihtelua.

Tarve sähkön kysyntäjoustolle on siis kasvussa. Energiaintensiivinen teollisuus on jo kantanut kortensa kekoon tällä saralla, joten tarve yhä pienempien kulutusportaiden tuomiselle kysyntäjoustomarkkinoille lisääntyy. Myös kotitaloudet voivat osallistua tähän, ainakin lämmityskuormien osalta. Kuitenkaan yksittäinen kotitalouskuluttaja ei voi tarjota kuormiaan kysyntäjoustoon markkinoilla. Sen sijaan jonkinlainen kysyntäjoustoprojektori voi kerätä lukuisia asiakkaita kannattavan kysyntäjoustoprojektin muodostamiseksi.

Kysyntäjoustoprojektin tarjoaminen pelkästään Elspot-pörssissä ei ole taloudellisesti kannattavaa. Sen sijaan jos saman kysyntäjoustoprojektin piirissä olevan kuorman voisi hyödyntää sekä Nord Poolin markkinoilla, että Fingridin taajuusohjatun käyttö- ja häiriöreservin sekä säätösähkön tuntimarkkinoilla, voidaan saavuttaa taloudellisesti kannattava lopputulos. Kuten kappaleen 2.4 lopussa huomautettiin, tämä vaatii kehittyneitä ennustusmalleja kulutukselle ja eri markkinoiden hinnoille, sekä kunnollisen tarjousstrategian, jossa hyödynnetään riskinhallintamenetelmiä.

Lopuksi huomautetaan, että kotitalouksien kysyntäjoustoon soveltuvan kuorman määrä on hyvin lähellä tuulella tuotetun sähköenergian päivittäisen vaihtelun määrää. Jatkossa voisi olla syytä selvittää, voisivatko tuulella tuotettua sähköä käyttävät kuluttajat tasoittaa kuormaansa tuulisähkön vaihtelun mukaan kysyntäjoustossa. Joka

tapauksessa, kotitalouksien sähkölämmityskuormissa piilee huomattava, toistaiseksi hyödyntämätön reservi, joka otetaan käyttöön ennemmin tai myöhemmin.

3 Kysyntäjoustopuotteistaminen

Ennen kuin lähdetään kehittämään kotitalouksien teknisiä ratkaisuja sähkön kysyntäjoustopuotteelle, pitää olla selvyyttä siitä, mitä ratkaisulla pyritään konkreettisesti saavuttamaan. Pelkästään varsinaiselle lämmityskuorman ohjaukselle yksittäisessä kotitaloudessa on vähintään kaksi eri tapaa, ja riippuen siitä, ohjataan kotitalouksia yhden muuntamon alta kerrallaan tai hajautetusti, voi ohjauksella olla erilaisia vaikutuksia jakeluverkkoon. Jotta vältetään jakeluverkon kannalta haitalliset tilanteet, pitää kysyntäjoustopuotteen aggregaattorin järjestelmän tarvittaessa keskustella myös jakeluverkkoyhtiön ja mahdollisesti muiden osapuolien järjestelmän kanssa. Edellämainittujen syiden takia tässä luvussa luodaan katsaus mahdollisiin lämmityskuormien ohjaustapoihin, ohjauksen vaikutuksiin jakeluverkkoon, sekä tietojärjestelmärajapintoihin ja kysyntäjoustopuotteeseen vaikuttaviin standardeihin.

Sähkön kysyntäjoustopuote ei myöskään ole itsestäänselvästi hittituote kotitalouksissa. Kotitalouksille riittävät kannustimet käydään myös läpi luvussa. Tähän vaikuttaa myös energia-alan sääntely. Luvussa myös vedetään yhteen mainittujen osa-alueiden asettamat vaatimukset kysyntäjoustopuotteen tiedonsiirrolle ja laitteistolle. Lopuksi tarkastellaan muutamaa aiemmin toteutettua kysyntäjoustopuotteen pilottiprojektia ja selvitetään, opittiinko niistä jotain merkittävää.

3.1 Kuormien ohjaustavat

Yksinkertaisin tapa toteuttaa kotitalouden lämmityskuorman ohjaus on kytkeä sähkölämmitysjärjestelmän sähköt kokonaan pois ohjauksen ajaksi. Kun tällainen pois ohjattu kuorma kytketään takaisin päälle, voi takaisinkytkentä aiheuttaa ns. jälkihuipun, eli suurentuneen vaatimuksen sähköverkosta otettavalle teholle. Jälkihuippu syntyy, jos pois ohjattu energiamäärä käytetään ohjausta seuraavina tunteina. Etenkin suoran sähkölämmityksen ohjauksessa jälkihuippu on todennäköinen.[1, s. 168]

Sähköverkon kannalta voisi olla taloudellisempaa käyttää sähkölämmityksen lämpötilan pudotus -toimintoa, toisin sanoen termostaatin asetteluarvon alentamista sähkölämmitysjärjestelmässä, jossa varsinaiset lämpöpatterit ovat ns. orjapattereita, ja termostaatti on esimerkiksi erikseen huoneen seinällä. Tällöin myös normaalin lämpötilan asetusarvon palautus voitaisiin hoitaa askelletusti, jotta jälkihuippu pieneneisi. Lämpötilan pudotus -toimintoa ei tosin voi hyödyntää, jos lämpöpatteri ei sitä jo valmiiksi tue. Aihetta käsitellään lisää luvussa 5.1.

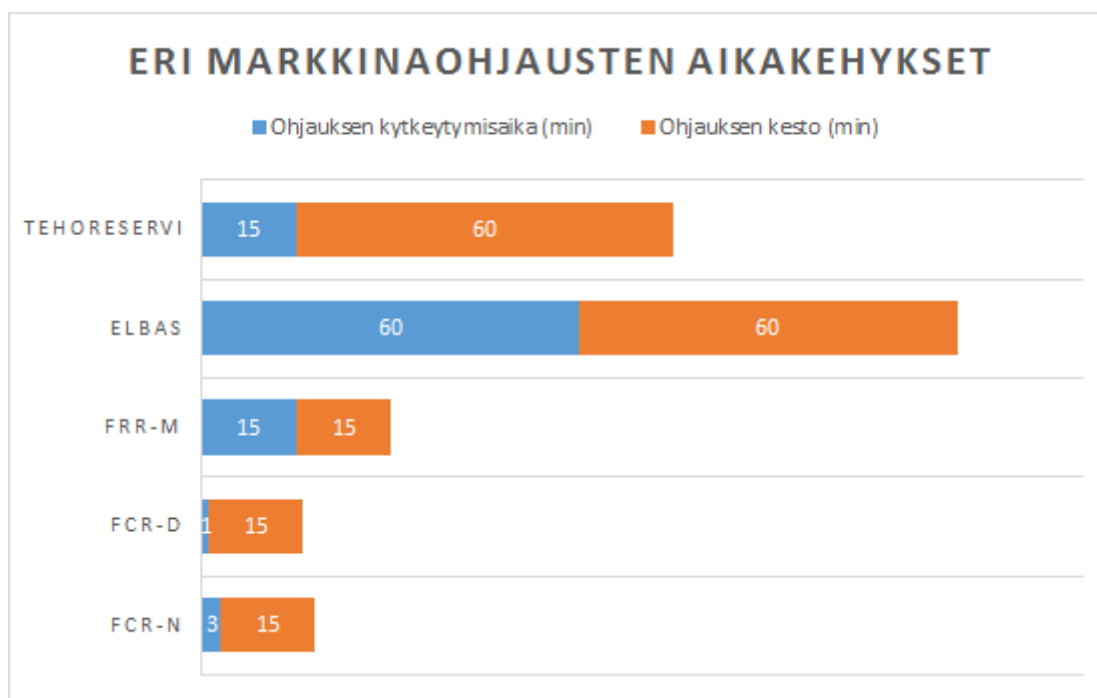
Kun kuormituksia ohjataan kaikille asiakkaille yhtenäisen ohjaussignaalin avulla, vähenee kuormien risteily jakeluverkossa, mikä kasvattaa verkon tehoa. Esimerkiksi yösaikalla toimivien, varaavien sähkölämmitysten yhteydessä on verkossa näkynyt kuormituksen kasvu lämmitysten kytkeytyessä illalla päälle. Jos ohjauksen piiriin otetaan varaavan lämmityksen lisäksi suora sähkölämmitys, voi jakeluverkon huippukuormitus kasvaa nykyisestä, etenkin jos verkon alueella on suosittu enemmän suoraa sähkölämmitystä.[1, s. 35]

Edellytykseksi verkon kokonaistehokkuuden toteutumiselle suoran sähkölämmityksen ohjauksessa on ehdotettu tehopohjaista siirtotariffia sähkön siirtoon. Tällöin asiakkaan huomio kiinnittyy siirretyn energian määrän lisäksi myös tehoon, eikä

markkinahintapohjaisella ohjauksella saavutettu hyöty häviää verkon kapasiteettitarpeen kasvamisena ja siten suurentuneena siirtomaksuna.[1, s. 35] Toisaalta tiukka tehorojoitus tariffin muodossa voi rajoittaa kysyntäjoustop hyödyntämistä, sillä jälkipiikki suurentaa tehotariffia käytettäessä aina sähkönjakelun kustannuksia.

DR-poolin loppuraporttia varten tehdyissä kuormanohjaussimulaatioissa jakeluverkon huipputehot nousivat huomattavasti nimellistehoja korkeammaksi kuormanohjauksen ympärillä. Vaikkakin laitteiston kapasiteetti kestäisi hetkellisesti suureman kuormituksen, päädyttiin raportissa suositukseen, että jos verkon kapasiteetti ei riitä kylmimpien ja kovien kuormitustilanteiden aikana kuormien ohjaamiseen, ei kuormanohjauksia pitäisi tällöin tehdä kysyntäjoustop aggregaattorin toimesta.[1, s. 174]

Kuten edellisessä luvussa todettiin, kysyntäjoustop on useita soveltuvia markkinoita. Eri markkinat edellyttävät osallistujalta kykyä reagoida ohjaukseen tai autonomisesti mitattuun häiriöön eri aikaraameissa, ja mahdollisesti myös eri suuruisia vähimmäisaikoja ohjaukseen osallistumiselle. Eri markkinaohjausten aikakehyksiä on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2: Eri markkinapaikkojen ohjausten vaaditut kytkeytymisaajat, ja ohjausten keskimääräiset kestot. Elspot-markkina on jätetty kuvasta pois, sillä 12 h:n kytkeytymisaika ohjauskäskylle on moninkertainen muihin havainnollistettaviin aikoihin nähden.

Nämä aikaraamit asettavat etenkin ohjauskäskyjen tai hintatietojen siirtotavoille reunaehdoja. Siinä missä Elspot-markkinan hintatiedon lataamiseen on aikaa ainakin 12 h ennen kulutustuntia, pitää nopeissa reserveissa aktivointikäskyn johtaa kuormanohjaukseen tunnin sisällä käskyn antamisen jälkeen. Taajuushäiriön tapauksessa, edellyttäen että aggregaattorin tarjous tuntimarkkinoille on hyväksytty, kuorman tu-

lee reagoida minuuteissa, ellei jopa sekunneissa täysin itsenäisesti, ellei aggregaattori halua ohjata tätä reserviä keskitetysti. Näin ollen päätettäessä siitä, miten kysyntäjoustoon osallistuvalla kuormalle välitetään ohjauskäskyjä, päätetään samalla myös siitä, mille markkinoille kuorma voi osallistua ja miten. Taajuusreserveihin osallistuttaessa voi automaattinen aktivointi kulutuspaikalla toteutetun taajuusmittauksen perusteella olla järkevämpi vaihtoehto kuin ohjauskäskyn odottaminen aggregaattorin järjestelmältä, etenkin jos ohjauskäskyjen siirtymiseen on odotettavissa pitkä vasteaika.

Myöhemmin työssä viitataan nopeaan ja hitaaseen ohjaukseen. *Hitaalla ohjauksella* tarkoitetaan kuorman ohjaamista sellaisen markkinan perusteella, jossa ohjauskäskyn välittämiseen voidaan käyttää useita tunteja. *Nopealla ohjauksella* tarkoitetaan vastaavasti kuormituksen osallistumista markkinalle, jossa ohjauskäskyn pitää välittyä tuntia lyhyemmässä ajassa.

Ohjauskäskyjen siirtotietä valitessa pitää myös päättää, miten todennetaan kuorman ohjauksen toteutuminen. Jos tiedonsiirtokanava ohjauskäskyille on yksisuuntainen, pitää tieto ohjauksen toteutumisesta välittää muuten, tai päätellä epäsuorasti esimerkiksi tuntikohtaisesta kulutusdatasta. Tähän mennessä esimerkiksi Fingrid on edellyttänyt taajuusreserveihin osallistuvilta kuormilta suoraa tehomittausta[9].

Suora kuorman ohjauksen todentaminen pitäisi tehdä sekuntitarkkuudella tehomittauksena, mittaamalla kulunut teho suoraan ohjattavasta kuormasta tai ryhmäkeskuksesta. Tehomittauksen avulla olisi myös helppo todentaa kysyntäjoustoon todellisuudessa tarjolla oleva kuorma, mikä edellyttää myös tämän tiedon siirtämistä kysyntäjoustopalveluntarjoajalle.[1, s. 156–157]

Kysyntäjoustopalvelun sähkölämmityksen tapauksessa tulisi tapahtua siten, että ohjaus ei tunnu kuluttajalle huonelämpötilan laskuna, toisin sanoen asumismukavuus ei saa kärsiä kysyntäjoustopalvelusta. Tämä asettaa osaltaan reunaehdot ohjattavaksi soveltuvalle kuormalle, ja pisimmälle mahdolliselle ohjausajalle sekä ohjausta seuraavalle kieltoajalle, jolla estetään peräkkäiset ohjausjaksot. Mahdollisiin ohjausaikoihin liittyy myös toisaalta rakennuksen eristystaso, jonka huomioimista käsitellään kappaleessa 3.2.

Varaava sähkölämmitys soveltuu parhaiten pitkäkestoiisiin ohjauksiin, sillä kuorman poiskytkeminen pitkäksi aikaa ei tunnu asumismukavuudessa välittömästi. Käytännön ohjattavuuden ja taloudellisen potentiaalin arvioinnin kannalta on huomioitava kaksi seikkaa: varaavan lämmityksen poiskytkentäaika on hankala ennustaa, ainakin ilman todellista mittausdataa huoneiston lämpötilasta tai ilman talon energiamallia, ja kuorma on todellisuudessa ohjattavissa vain kylminä vuodenaikoina ja yöaikaan. Lisäksi on huomioitava, että osa varaavasta sähkölämmityskuormasta on jo jakeluverkkoyhtiöiden ohjauksessa kaksiaika- tai kausitariffin mukaisesti. Kun nämä seikat huomioidaan, voidaan varaavan sähkölämmityskuorman todeta soveltuvan monille eri tuntimarkkinoille, jopa tuntia pidemmäksi ajaksi, mutta taloudellista potentiaalia rajoittaa ohjausmahdollisuuden osuminen lähinnä yöaikaan.[1, s. 52–53]

Suora sähkölämmitys, osittain varaava sähkölämmitys ja käyttöveden sähkölämmitys ovat keskenään samankaltaisia ohjattavia kuormia, jotka voivat kytkeytyä päälle tai pois mihin vuorokauden aikaan tahansa, lämmitystarpeesta riippuen. Nämä kuormat soveltuvat parhaiten markkinoille, joilla ohjattavaa kapasiteettia tar-

vitaan suhteellisen lyhyen aikaa, esimerkiksi tunnin ajan, joten periaatteessa nämä kuormaryhmät sopivat kaikille tuntimarkkinoille. Reservikäytön kannalta ohjattavan kapasiteetin riittävyys ja todentaminen edellyttävät reaaliaikaista ja tarkkaa kuormien tehomittauksia.[1, s. 53–54]

Myöhemmin työssä viitataan varaavaan sähkölämmityskuormaan *pitkäkestoisesti ohjattavana kuormana*, joka soveltuu hyvin myös *hitaaseen ohjaukseen*, ja suoraan sähkölämmityskuormaan *lyhytkestoisesti ohjattavana kuormana*, joka soveltuu parhaiten *nopeaan ohjaukseen*.

3.2 Kiinteistöjen mallintaminen

Kysyntäjouston ei ole tarkoitus vaikuttaa asumismukavuuteen kotitalouksissa. Tähän tavoitteeseen voidaan pyrkiä rajoittamalla ohjausaikaa, tai ohjaamalla vain osaa lämmityskuormasta. Ohjauksen optimoinnissa ja todentamisessa voidaan hyödyntää paitsi tilastollisia menetelmiä, joita tässä työssä ei esitellä, myös erilaisia matemaattisia mallinnuksia sähkölaitekuormasta ja kiinteistön lämpötilasta. Näitä malleja tarkastellaan lyhyesti tässä kappaleessa.

Sähkölaitokset ovat mallintaneet itse sähkönkäytön lämpötilariippuvuutta jo varhain. Suomen sähkölaitosyhdistys ry:n (nyk. Sähköenergialiitto ry Sener) julkaisussa SLY 5/92 ”Sähkön käytön kuormitustutkimus 1992” tälle riippuvuudelle on annettu kaava, joka on esitetty lähteessä [1, s. 169] muodossa

$$q_{tod}(t) = q_0(t) + B \cdot \Delta T(t) \quad (1)$$

missä

$q_{tod}(t)$	on mitattu sähkön käyttö hetkellä t
$q_0(t)$	on sähkön käyttö normaalissa ulkolämpötilassa hetkellä t
B	on sähkön käytön lämpötilariippuvuutta kuvaava vakiokerroin
$\Delta T(t)$	on mitatun ja normaalin ulkolämpötilan poikkeama hetkellä t

Tästä lineaarisesta mallista voidaan määrittää ainakin sähkölämmityksen osuus kulutetusta tehosta. Erityisesti kysyntäjouston kohdalla voisi harkita, voiko tätä kaavaa hyödyntää kuormanohjauksen todentamisessa jälkikäteen mittausdatasta.

Quebecissä paikallinen, suuri sähköntuottaja Hydro-Quebec selvitti vuonna 2006, miten sähkönkysyntä muuttui aamuisin sähkölämmitteisellä pientaloalueella, jossa asukkailla oli ohjelmoitava termostaatti. Termostaattien profiili oli pääsääntöisesti ohjelmoitu siten, että yöaikaan asetustilämpötila oli 2–3 °C alempi kuin normaali asetustilämpötila, ja asetustilämpötila palautettiin normaaliksi noin aamukuudelta. Selvityksessä kehitettiin myös kaavan 2 mukainen malli ajalle, joka vaaditaan, että asuinkiinteistön lämpötila palautuu asetusarvoonsa:[12]

$$t = \frac{C\Delta T}{P_{tot} - UA(T_{set} - T_{out})} \quad (2)$$

missä

C	on massavakio (kWh/°C),
ΔT	on termostaatin normaalin ja alennetun asetuksen ero (°C),
P_{tot}	on asennettu lämmityskapasiteetti (kW),
UA	on lämpöväviökerroin (kW/°C),
T_{set}	on termostaatin normaali asetuslämpötila (°C),
T_{out}	on vallitseva ulkolämpötila (°C).

Kotitalouden asumislämpötilaa voi olla mallintamassa useita tahoja. Ensinnäkin, kotitalous itse voi kysyntäjoustoprojektista sopiessaan käyttää mallia osoittamaan, miten paljon kotitalousasiakkaalle sopiva lämpötila vaikuttaa tehonkulutukseen. Myös kysyntäjoustoaggregaattori voi itse mallintaa kotitalouksien lämpövajauksia, ja päättää sen perusteella markkinoille tarjottavasta kysyntäjoustoprojektista. Laajimmassa tapauksessa kantaverkkoyhtiö suorittaa mallien perusteella laskennan, paljonko lämmitystehoa olisi nopeasti poiskytkettävissä häiriötilanteen aikana, asumismukavuuden kärsimättä.

Huomataan, että eri tahoilla voi olla erilaisia intressejä rakennuksen lämpötilan mallintamisen suhteen. Voi olla myös turhaa laskea lämpötilan pudotuksia uudestaan aina uuteen järjestelmään siirryttäessä. Kunkin tahon mallinnusten tulosten pitäisi siis mahdollisesti olla jaettavissa kaikkien osapuolten kesken, mutta tuotetun tiedon jakamisessa pitää olla yhteiset pelisäännöt tiedonsiirrosta ja eri järjestelmien yhteispelistä. Näistä keskustellaan laajemmin seuraavassa kappaleessa.

3.3 Järjestelmästandardit

Aiemmasta käsittelystä on tullut ilmi, että kotitalouden sähkönkulutuksen kysyntäjoustoprojektissa voi useammalla taholla olla intressejä käsitellä kysyntäjoustoprojektin kussakin vaiheessa tuotettua tietoa. Tiedonjako pitääkin saada toimimaan yhteisillä säännöillä, etenkin kun tiedonsiirto- ja laitetuottajia voi olla useita kysyntäjoustoprojektin eri tasoilla. Myös eri järjestelmien ylläpidettävyyden kannalta standardin olemassaolo on tärkeää. Asiaa ei toisaalta helpota se, että sähkönkulutuksen kysyntäjoustoprojektin tiimoilta on valmisteilla jopa kolme keskenään erilaista, kilpailevaa standardia. Seuraavaksi käsitellään lyhyesti kysyntäjoustoprojektin standardoinnin nykytilaa.

Euroopassa CENELEC on luonostellut standardin prEN 50491-12 sähköverkon ja rakennuksen data- ja kommunikaatorajapinnalle. Standardi määrittelee, miten kuluttajan energianhallintajärjestelmään (CEM) liitetyt laitteet ja järjestelmät soveltuvat sanomien esitysformaatteja siirryttäessä rajapinnasta toiseen. Tämä avoin rajapinta mahdollistaa ohjauskäskyjen ja niiden toimentamisen välittämisen rakennuksesta sähköverkkoon ja toisinpäin. Standardin tavoitteena onkin mahdollistaa laitteiden yhteentoimivuus, vaikka uusia teknologisia ratkaisuja tulisi tarjolle.[1, s. 226–227]

Kiinteistöautomaation standardi IEC 62746 määrittelee, miten kiinteistöautomaatiojärjestelmä voi viestiä operaattorien ja palveluntarjoajien suuntaan. Lisäksi

standardin osan 3 (Arkkitehtuuri) valmistuminen selkeyttää avoimiin teknologioihin ja standardeihin perustuvia rajapintoja.[1, s. 227–228]

Yhdysvalloissa sitä vastoin ajetaan voimakkaasti hajautettujen energiaressurssien standardointia OpenADR-järjestön valmisteleman profiilin kautta. Lisäksi Saksassa on kehitetty erikseen EEBus-arkkitehtuuria, jonka on tarkoitus mahdollistaa kotitalouksille sähkönkulutuksen etämittaroinnin lisäksi monipuoliset älykkään sähkönkulutuksen ja pientuotannon palvelut.[1, s. 228] Tämän tyylinen kilpaileva standardointityö ei välttämättä helpota yhtenäisen kysyntäjoustoprofiilin standardin omaksumista Suomessa.

3.4 Kuluttajan aktivointi

Kotitalouskuluttajan kannalta sähkön kysyntäjousto voi mahdollistaa mm. sähkön käytön edullisen hinnan aikana, ostosähkön vähentämisen ja asiakkaan oman pientuotannon täysimääräisen hyödyntämisen, huipputehojen pienentämisen ja liittymäkoon rajoittamisen. Sähkön pientuottajan kannalta oma tuotanto on taloudellisesti kannattavinta silloin, kun sen pystyy käyttämään omassa kiinteistössä, sillä sähköä myymällä saa korvauksen ainoastaan sähköenergiasta, kun sähköä ostettaessa kuluttaja joutuu maksamaan päälle siirtomaksut ja verot. Näin kysyntäjousto parantaa pientuotannon kannattavuutta, jos kuluttajan kiinteistö pystyy mukautumaan vaihtelevaan pientuotannon määrään.[1, s. 25]

Euroopan komissio antoi kesällä 2015 tiedonannon[13] energian kuluttajien aseman vahvistamisesta. Tiedonannon kysyntäjoustopolitiikkaa koskeva osa linjaa selvästi, että joustava kulutus pitää palkita ensisijaisesti hintasignaalilla, ja toissijaisesti verkkomaksun alentamisena, kun jousto tapahtuu verkon ylikuormittamisen helpottamiseksi. Selvää tiedonannon pohjalta on myös se, että kysyntäjoustopolitiikkaan osallistumattomuudesta. Näin ollen kuluttajia *ei voi lailla velvoittaa* kysyntäjoustopolitiikkaan, vaan on ensisijaisesti kysyntäjoustopolitiikkaaggregaattorin velvollisuus kehittää riittävän houkutteleva kannustin kuluttajalle.

Kuten Raininko toteaa erikoistyössään[14] kuluttajan aktivointiin tähtäävistä toimenpiteistä, sähkö on kuluttajan näkökulmasta helppokäyttöinen, jopa itsestään selvä hyödyke, joten on mahdollista, että kuluttaja ei halua omaksua aktiivista roolia sähkömarkkinoilla. Näin voi käydä, jos esimerkiksi kysyntäjoustopolitiikkaan osallistumisesta saatava hyöty ei kuluttajan mielestä ole vaivan arvoinen. Yhdessä edellä mainitun komission tiedonannon kanssa tämä tarkoittaa entistä suurempaa painoarvoa riittävän kannustimen kehittämiseksi.

Sähkönmyyjillä onkin tärkeä rooli tämän kannustimen kehittämisessä, kun uusia sähkötuotteita ja -palveluita lanseerataan. Kysyntäjoustopolitiikkaan yleistyminen edellyttää tehokasta tuotteistamista, jonka lopputuloksena kuluttaja ymmärtää, mitä kysyntäjoustopolitiikkaan osallistuminen tarkoittaa käytännössä, taloudellisen edun lisäksi. Liian vaikeaselkoinen kysyntäjoustopolitiikka voi myös olla kuluttajia passivoiva tekijä. Huomataan, että suurin epävarmuustekijä kuluttajan aktivoimisessa on kuluttaja itse.[14]

Kysyntäjoustopolitiikkaan soveltuvan laitteiston hankkiminen ja asentaminen voi vaatia kuluttajalta taloudellista panostusta. Erilaisia etäohjattavia laitteistoja on tarjolla kirjava määrä, kuten luvusta 5 käy ilmi. Vaikeudet oikean laitteiston hankkimisessa

voivat passivoida kuluttajaa edelleen, joten laitteistosta tiedottamiseen pitää panostaa, ja kappaleessa 3.3 mainituista pelisäännöistä on sovittava, jotta eri laitteet toimisivat mahdollisimman hyvin yhteen. Alkuun voi myös olla, että asiakkaita ei houkutella kysyntäjoustopariin pelkästään automaattisella hintasäästöllä. Älykkäällä laitteistolla olisi siis suotavaa olla lisäominaisuuksia, jotka lisäävät sen houkuttelevuutta. Tässäkin pitää toisaalta olla tarkkana sen kanssa, ettei tarjottava tuote monimutkaistu liikaa.

Jos sähkönkulutuksen kysyntäjoustopariin soveltuvan laitteiston toimittaa kysyntäjoustoaggregaattori esimerkiksi kytkykauppana, on kuluttajan kannalta tutkittava, miten sähköntoimittajan vaihtuminen onnistuu kesken sopimuskauden. Energiantoimittajan vaihdostilanteessa olisi taattava, ettei jo asennettua laitteistoa tarvitse purkaa, ja että laitteisto toimisi suoraan uudenkin sähköntoimittajan järjestelmän kanssa. Myös riittävä toimittajan tuki kaikelle laitteistolle on taattava, ettei kuluttajan laitteisto muutu yhdessä yössä käyttökelvottomaksi tuen lakatessa.

3.5 Vaatimukset infrastruktuurille ja laitteistolle

Luvun yhteenvedona voidaan laatia lista vaatimuksista, jotka kysyntäjoustopariin järjestelmien, siirtoteiden ja kuluttajalaitteistojen on täytettävä, ennen kuin aggregaattori voi tarjota sekä liiketoimintansa että jakeluverkon kannalta optimaalisinta tuotetta kuluttajalle. Tässä asetetut vaatimukset ovat erittäin kattavat, ja huomataankin, että vaikka kappaleessa 3.7.3 esitetty There Corporationin ja Fingridin kysyntäjoustopilotti on pisimmälle Suomessa ehtinyt kotitalouksien kysyntäjoustopariksi, ei sekään täytä kaikkia tässä asetettuja vaatimuksia.

Yksittäistä kotitaloutta ohjaavalle automaatiolaitteistolle asetetaan seuraavat vaatimukset:

1. Automaatiikan pitää tukea asuntokohtaisesti joko suoraa tai varaavaa sähkölämmitystä, ja lisäksi sen pitää osata tarjota lämmityskuormaa sopivimmalle markkinalle. Lämpötilan pudotustoimintoa termostaatin asettelun kautta pitää hyödyntää.
2. Automaatiikan pitää olla käyttö- ja tietoturvallinen. Sen pitää torjua ulkopuoliset hyökkäykset, taaten samalla asiakkaan ja kiinteistön turvallisuuden sekä asumismukavuuden. Tietoverkon poikkeustilanteet eivät saa vaikuttaa lämmityksen ohjauksen käytettävyyteen.
3. Automaatiikan tulee toteuttaa seuraavia ominaisuuksia, jotta siitä olisi mahdollisimman paljon hyötyä kysyntäjoustoparissa:
 - kuluttajan asettama huonelämpötilan vaihtelualue, jotta asumismukavuus säilyy,
 - jälkihuipun välttäminen, esimerkiksi termostaatin asettelua hyödyntämällä,
 - taajuuden mittaus, jos kuorma osallistuu taajuusreservien markkinoille,

- tehomittaus riittävällä resoluutiolla, jotta ohjaus ja tarjottavissa oleva kuorma voidaan todentaa, ja
 - kommunikaation muiden kodin älykkäiden ratkaisujen kanssa tulee toimia mahdollisimman hyvin.
4. Kiinteistön lämmitysmallia tulee hyödyntää kysyntäjoustooson osallistuvan kuorman optimoinnissa, kuten kappaleessa 3.2 esitettiin.
 5. Kuluttajan pitäisi kyetä vaihtamaan sähköntoimittajaa ilman, että kuluttajan älykästä laitteistoa pitäisi vaihtaa uuteen. Laitteiston pitäisi siis kyetä toimimaan eri kysyntäjoustooson aggregaattorien järjestelmien kanssa.
 6. Koko kysyntäjoustoputuotteon on oltava kuluttajan ymmärrettävissä.
 7. Kotitaloudessa voi olla ennalta jotain kotiautomaatiota, jota halutaan täydentää kysyntäjoustoputuotteella. Kuluttaja voi myös haluta hankkia kysyntäjoustopjärjestelmän ohessa muuta kotiautomaatiota.

Sähkön kysyntäjoustooson aggregaattorin järjestelmän ja kodin älykkään laitteiston välisen tiedonsiirron on toteutettava seuraavat asiat:

1. vähintään yksisuuntainen tiedonsiirto ohjauksäskyjen tai sähkön markkinahinnan välittämiseksi,
2. kuorman ohjauksen todentamiseksi ja asiakkaan mittausdatan (esimerkiksi huonelämpötila) lähettämiseksi paluukanava tiedonsiirrolle, tarvittaessa jopa eri tekniikalla kuin ohjauksäskyjen siirtotie, ja
3. tiedonsiirtotavan on saavutettava sähkönkuluttaja kuluttajan maantieteellisestä asemasta riippumatta, sen markkinan aikaraamissa, jonne kuluttajan kuorma on myyty.

Lopuksi, sähkön kysyntäjoustooson aggregaattorin järjestelmän on täytettävä seuraavat ehdot:

1. järjestelmän on reagoitava kuluttajan suuntaan riittävän nopeasti kunkin kysyntäjoustooson markkinan kanssa,
2. järjestelmän avulla pitää kyetä todentamaan ohjauksen toteutumisen,
3. järjestelmä mahdollistaa tiedonvaihdon jakeluverkkoyhtiön ja mahdollisesti kantaverkkoyhtiön järjestelmien kanssa, ja
4. järjestelmä on yhteensopiva mahdollisimman monen eri kysyntäjoustooson toteuttavan kuluttajalaitteiston kanssa.

3.6 Fingrid Datahub

Fingrid on toteuttamassa datahub-nimellä kulkevaa, sähkön vähittäismarkkinoiden keskitettyä tiedonvaihtojärjestelmää vuoden 2013 sähkömarkkinalain vaatimusten mukaisesti, ja työ- ja elinkeinoministeriön pyynnöstä. Järjestelmä tulee sähkön myyjien ja jakeluverkkoyhtiöiden käyttöön, ja siihen tallennetaan tietoja Suomen 3,5 miljoonasta sähkönkäyttöpaikasta. Datahubin on tarkoitus helpottaa tiedon siirtymistä sähkön myyjältä toiselle, kun kuluttaja-asiakas vaihtaa myyjäänsä. Järjestelmän on tarkoitus olla tuotannossa vuonna 2019.[15]

Sähkön käyttöön liittyvien tietojen sijaitseminen yhdessä paikassa on tarkoitus nopeuttaa ja yksinkertaistaa kaikkien sähkömarkkinaosapuolten toimintaa. Jatkossa myös jakeluverkkoon liittyvä taseselvitys on tarkoitus tehdä uudessa järjestelmässä. Etäluettavien sähkömittareiden tuntilukemat kerätään myös datahubiin, uusien kuluttajapalveluiden helpottamiseksi. Näiksi luetaan myös kysyntäjousto.[15]

Datahub voisi siis toimia myös kantaverkkoyhtiön keskitettynä kysyntäjoustoprojektina. Se voisi silloin mahdollistaa kuluttajalle helpon sähkö- ja kysyntäjoustoprojektin vaihtamisen, ja kysyntäjoustoprojektin aggregaattorille ja jakeluverkkoyhtiölle keskinäisen tietojenvaihdon. Datahub olisi tällöin rajapinta myös eri kysyntäjoustoprojektin älykkäiden laitteiden, sähkönmyyjien ja kysyntäjoustoprojektin aggregaattorien välillä.

3.7 Toteutetut kysyntäjoustoprojektit

Kolmannen luvun lopuksi tutustutaan kolmeen toteutettuun sähkön kysyntäjoustoprojektiin. Projektien laajuudet vaihtelevat aikamoisesti keskenään, mutta kaikilla on pyritty perustelemaan kysyntäjoustoprojektin olevan käytännössä toteutettavissa sekä kotitalouksissa että liikekiinteistöissä.

3.7.1 Malvik Everk

Keski-Norjassa Malvik Everk -jakeluverkko-operaattori toteutti oman, osin AMR-mittarointiin pohjaavan kysyntäjoustoprojektin 40 valitulle asiakkaalle vuonna 2010. Pilotin aikana ohjattiin etänä AMR-järjestelmän yli kuluttajien sähkökäyttöisiä vesikiertoisia lämmitysjärjestelmiä, sekä sähköisiä lämmminvesivaraajia. Lisäksi asiakkaita kehoitettiin välttämään muutakin sähkönkäyttöä jakamalla heille jääkaappimagneetteja, joihin kellon muotoon merkittyjen sähkönkulutuksen huipputuntien tuli muistuttaa sähkönkäytön siirtämisestä edullisempaan ajankohtaan. Kannustimena kuluttajalle toimi päivittäin vaihteleva sähkönsiirron tariffi, jota varten piti saada Norjan energiamarkkinaviranomaiselta poikkeuslupa.[16]

Tutkimuksen lopputulokset ovat otanta huomioiden epävarmat, mutta kirjoittajat päätyivät suhteellisen positiiviseen näkemykseen. Heidän mielestään kotitalouksien kysyntäjousto on taloudellisesti järkevää, kun käytettävissä on ennustettava hintasignaali sekä kuormien etäohjaus. Kirjoittajat myös painottivat ymmärrettävää tiedottamista asiakkaan suuntaan.[16]

Tätä tutkimusta ajatellen kyseisen artikkelin tulokset ovat pohjaa luovia, mutteivät juurikaan tämän tutkimuksen asiaan liittyviä. Kysyntäjoustoprojektia on toteuttamassa

jakeluverkkoyhtiö, tariffina ei ole Elspot-hinta, ja ohjauskäskyjen kulkutienä on jakeluverkkoyhtiön infrastruktuuri.

3.7.2 Toimistorakennuksen jäähdytyksen ohjaus

Ville Jokinen on kehittänyt diplomityössään[17] toimistokiinteistön jäähdytyskuormille Elspot-markkinahintaan perustuvan kuormanohjauksen. Käytännössä kuormanrajoitus toteutettiin Fidelix Oy:n rakennusautomaatiojärjestelmällä, pysäyttämällä jäähdytys- tai lämmityssäätö ja nollaamalla tehonpyynti ohjelmallisesti rakennusautomaatiosta. Diplomityön aikataulun johdosta ratkaisussa ei huomioitu kiinteistön lämpödynaamista käyttäytymistä, vaikka siihen olisi rakennusautomaation pohjalta ollut mahdollisuus, koska säätiedot olivat järjestelmässä automaattisesti tarjolla. Siksi ratkaisun algoritmi käytännössä valitsi Elspot-markkinan hintadatasta kaksi päivän kalleinta tuntia siten, että tuntien välissä oli vähintään kaksi tuntia väliä, ja rajoitti jäähdytyskuormia näiden osalta.

NordPool Spotista hintadata haettiin 3G-yhteyden yli. Mainittu 3G-yhteys osoitautui epäluotettavaksi valitun reitittimen osalta. Varsinainen järjestelmän ohjelmointi toteutettiin IEC-standardiin 61131-3 perustuvalla Infoteam OpenPCS 2008 -ohjelmointityökalulla.[17] Eli vaikka Fidelixin rakennusautomaatio olisikin ulkopuolisilta suljettu ratkaisu, on itse ohjelma mahdollisesti siirrettävissä samaa standardia soveltaviin järjestelmiin. Työssä ei otettu huomioon mahdollisuutta antaa jonkinlainen rajapinta sähkönmyyjän tai Fingridin suuntaan, mutta mainittu standardi saattaa mahdollistaa tämänkin.

Kuormanrajoituksen pilottijakso oli kesäkuussa 2014, ja valitun ajankohdan johdosta sähkön hintapiikkejä ei testijaksolle osunut. Ohjauksella ei siis saatu merkittäviä säästöjä, vaikka ohjaus teknisesti toimi odotetusti. Jokinen arvioi työssään, että esimerkiksi vuoden 2014 tammikuun sähkönhinnoilla säästöä olisi voinut kertyä jopa 7 % kalleinta päivää kohden.[17] On kuitenkin huomioitava, että koska kyseessä on liikekiinteistölle tehty kuormanohjaus, ei ratkaisu välttämättä ole sellaisenaan sovellettavissa kotitalouksissa.

3.7.3 Fingrid ja There Corporation

There Corporation Oy on toteuttanut yhteistyössä Fingridin kanssa kysyntäjouaston pilottiprojektin kotitalousasiakkailla. Pilotissa tutkittiin, miten Theren kehittämää kodin energianhallintajärjestelmää (HEMS) voidaan hyödyntää kysyntäjoustromarkkinoilla, ja miten tarkoitusta varten kehitetyt aggregointisovellus ja operaattorin käyttöliittymä toimivat. Pilotissa ohjattaviksi kuormiksi tarjottiin käyttövesivaraajia tarjousmallilla, jonka toteutumistodennäköisyys oli lähes 100 %.[18]

Monipuoliset toiminnallisuudet sekä kuluttajalle että kysyntäjouaston operaattorille mahdollistaa Theren pilvipalvelu. Pilvipalvelun kautta kuluttaja voi ohjata ja seurata kodin lämmitystä, ja operaattori voi sen kautta ajoittaa ja seurata kuormanohjauksia, sekä seurata kuormanohjaustarjouksia niin pitkälle kuin kotien lämmitysuunnitelmia on tarjolla. Palveluun saadaan myös kodin lämpötila- ja tilatiedot, sekä sää- ja sähkönkulutustiedot. Lämmityksen ohjaus tapahtuu automaattisesti ennalta asetetun ohjausaikataulun, kuluttajan määrittelemän lämpötilan mukavuusalueen

ja mitattujen lämpötilojen perusteella. Yhteys kotitalouden energianhallintajärjestelmään on toteutettu Internetin ylitse.[18] Käytetyn energianhallintajärjestelmän keskusyksikkö on laite nimeltä ThereGate, jonka toiminta on tarkemmin kuvattu kappaleessa 5.2.5.

Pilotin perusteella kotien lämmityskuormat todettiin teknisesti soveltuviksi kysyntäjoustomarkkinoille, vaikka tarjottuina kuormina oli vain lämminvesivaraajia. Kuormien luotettavuudelle ja vasteajalle asetetut vaatimukset täyttyivät, ja keskimääräiseksi vasteajaksi saatiin 2,3 s. Kuormanohjausten onnistumisen todennäköisyydeksi saatiin 100 %, mikä johtuu pilotin tiukoista tarjoussäännöistä ja pienestä otannasta. Kohteet, joiden Internet-yhteys oli heikko tai pois käytöstä, jätettiin tarjouksista pois. Myös pilotin maantieteellinen kattavuus jäi pieneksi, mikä näkyy vasteajassa. Toetuneesta kuormanohjauksesta seuranneen lämmitysaikataulun uudelleenlaskennan osiltaan aiheuttaman jälkiinkin vaikutukset arvioitiin myös pieniksi.[18]

Haastattelussa[19] Theren projektijohtaja Ilkka Palolan kanssa keskusteltiin, miten paljon Theren algoritmilla olisi mahdollista säästää lämmitysenergiassa. Palolan kokemuksen perusteella absoluuttisen säästön mallintamisessa on huomioitava niin monta tekijää, että se on käytännössä hyvin vaikeaa. Kokeellisen näytön perusteella säästöjä on kuitenkin saavutettavissa Elspot-markkinalla huomattavasti enemmän, kuin kappaleessa 2.4 esitetyn DR-poolin laskelman mukaan oli saavutettavissa. Lisäksi Theren tuotteen hankinnassa on toistaiseksi kyse enemmän mukavuudenhalusta, kuin absoluuttisesta säästöstä. Tämä on myös konsistenttia kotiautomaatiosta tehdyn markkinatutkimuksen perusteella, johon paneudutaan tarkemmin kappaleessa 5.2.

Lisäksi Palola totesi haastattelussaan[19], että toistaiseksi liiketoimintamalli kotitalouden kysyntäjoustop ympärillä näyttää ohuelta. Samaa mieltä ollaan myös Schneider Electricilla ratkaisuarkkitehti Tuomas Pylväsen haastattelun[20] perusteella. Theren pilotissa ei käytetty minkäänlaista kannustinta kuluttajalle. Vaikuttaa siltä, että nykyisillä kysyntäjoustomarkkinoiden hinnoilla ei olisi saatavilla merkittävää rahallista hyötyä kuluttajalle. Osansa kotitalouden kysyntäjoustop liiketoimintamallin heikkouteen tuo myös se, että muita kuin lämminvesivaraajien kuormia on vaikeampi ennustaa.

Kokonaisuudessaan Theren pilotti, rajoituksistaan huolimatta, ja Theren tuote täyttävät näillä tiedoin kattavimmin kappaleessa 3.5 asetetut vaatimukset kuluttajan kysyntäjoustop järjestelmälle.

4 Ohjauskäskyjen välittäminen kuormille

Kappaleessa 3.1 tarkasteltiin, mitä vasteita eri kysyntäjouaston markkinat odottavat kuormilta. Tässä tutkimuksessa oletetaan, että kotitalouksien kuormien vasteaika määräytyy täysin käytetyn tiedonsiirtotien latenssin mukaan. Mitä useammalle markkinalle kotitalouden kuormaa haluaa tarjota, sitä pienempi vasteajan tulee olla, ja lopulta valittu tiedonsiirtotie saattaa rajata kuorman pois nopeiden ohjausten markkinoilta.

Kappaleessa 3.5 asetettiin vaatimukset kysyntäjouaston ohjauskäskyjen tiedonsiirrolle: tiedonsiirtokanavan tulee mahdollistaa ainakin luotettava, yhdensuuntainen tiedonsiirto; kuorman suora todentaminen esimerkiksi tehomittauksella ja huonelämpötilan mittausdatan hyödyntäminen operaattorin päässä edellyttävät myös paluukanavaa; ja tiedonsiirtokanavan on saavutettava sähkönkuluttaja tämän maantieteellisestä asemasta riippumatta, käytetyn markkinan aikaraamien puitteissa. Varsinaista tiedonsiirtokapasiteettia tarvitaan suhteellisen vähän, joten vaatimuksissa painottuu luotettavuus ja maantieteellinen kattavuus. Tiheästi asutetulla alueella vaatimukset on helppo täyttää, mutta harvemmin asutuilla alueilla kaikkien vaatimusten täyttäminen ei ole itsestäänselvää.

Etäluentaa ja -ohjausta on ollut sähkönjakeluverkossa jo alkupäivistä lähtien. Yksi tuttu ohjausesimerkki on lämminvesivaraajien ohjaaminen kaksiaikatariffilla sähköverkkoa pitkin, ja nykyisin sähkönkulutusmittarien etäluentainfrastruktuurin kautta. Tämä siirtokanava on täysin sähkönjakeluyhtiöiden hallussa, joten jakeluverkon infrastruktuurin käyttäminen kuormien ohjaukseen ei ole itsestäänselvä valinta. Etäluennan infrastruktuuri käsitelläänkin vain lyhyesti kappaleessa 4.2, koska työn rajauksessa on nimenomaan päätetty hakea tälle vaihtoehtoja. Kotitalouksien tiedonsiirrossa valokuitu ja erilaiset mobiililaajakaistat ovat suosituimpia ratkaisuja, joten kysyntäjouaston ohjauksen voisi ajatella järjestyvän esimerkiksi Internetin kautta. Tähän liittyy toisaalta omat riskinsä, joista keskustellaan kappaleessa 4.3.

Erilaiset radiolinkit ovat myös vaihtoehtona nopeaan ohjaukseen, ja kahta esimerkitapausta tarkastellaan luvun lopuksi. Radioviestinnän tapauksessa hyviä puolia ovat hyvä maantieteellinen kattavuus ja siisti tapa toteuttaa nopeakin ohjaus, mutta kääntöpuolena pitää huomioida radio-operaattorin hinnasto, radiovastaanottimen energiankulutus ja antenniasennus, ja tiedonsiirtoväylän yksisuuntaisuus. Näitä etuja ja haasteita selvitettiin haastatteluin, joiden keskeisin sisältö on selostettu kappaleessa 4.4.

4.1 Viestiverkon turvallisuus- ja riskinäkökohtia

Sähkön siirto- ja jakeluverkossa on käytetty alusta asti erilaisia viestiverkkoja kauko-ohjaukseen ja valvontaan. Näiden turvallisuus- ja riskinäkökohtia tunnetaan jo erittäin hyvin, ja älykkään sähköverkon viestiverkkoa koskevat turvallisuuskysymykset koskevat myös kysyntäjouaston viestiverkkoa.

Älykkäässä sähköverkossa viestiverkon luotettavuusvaatimuksia määrittelee koko sähköjärjestelmää koskevat luotettavuusvaatimukset. Jotta koko sähköjärjestelmän luotettavuus olisi mahdollisimman suuri, tulee tällöin viestiverkon yksittäisten lait-

teidenkin, kuten reitittimien, kytkimien ja tukiasemien, olla erittäin luotettavia. Parannukset luotettavuuteen voivat myös tarkoittaa riippumattomien mikropiirien hyödyntämistä, luotettavaa ohjelmistoa, ja ääriolosuhteita kestäväää fyysistä laitteistoa. Viestiverkon luotettavuus riippuu monista tekijöistä, kuten käytetystä fyysisestä linkkikerroksesta, ympäristöstä (esimerkiksi maakaapeli vs. ilmajohto), säästä, ja mekaanisen yhteyden laadusta. Langattomien verkkojen kohdalla viestintä luvanalaisella taajuudella katsotaan luotettavammaksi kuin viestintä lisenssivapailla taajuuksilla, ja maakaapeli on useimmiten ilmajohtoa luotettavampi. Verkon luotettavuutta parantaa myös useampien fyysisten viestipolkujen käyttäminen, joko rakentamalla useampi rinnakkainen, mutta erillinen yhteys, tai rakentamalla verkko rengasmaiseksi, jolloin yhteys on mahdollinen useampaa polkua pitkin. Verkon laitteistojen kanssa voidaan käyttää myös useampaa vastaanotinta viesteille.[21, s. 199–202]

Viestiverkon turvallisuutta voi ensi tilassa parantaa suodattamalla reitittimistä läpi vain haluttu liikenne sallituista IP-osoitteista. Vastaavasti voidaan myös sallia liikenne vain tiettyihin reitittimeen yhdistettyihin laitteisiin kohde-IP-osoitteen perusteella. Pelkät estolistat eivät kuitenkaan riitä, vaan palomuuuri ja tunkeutumisen tunnistaminen sekä estäminen ovat tavanomaisia lisäturvatoimia, jotka löytyvät verkon reitittimen lisäksi usein myös reitittimeen yhdistyvistä laitteista. Lopulta myös itse viesti voidaan salata, jolloin sen sisällön pitäisi avautua vain lähettävälle ja vastaanottavalle osapuolelle.[21, s. 203–204]

Älykäs sähköverkko on vielä kehittyvä järjestelmä, jonka kaikkia mahdollisia sovelluksia ei vielä hyödynnetä. Siksi sen viestiverkon rakentamisessa on otettava huomioon tulevat sovellukset, jotta viestiverkko tukisi uusia sovelluksia mahdollisimman vähin muutoksin. Verkon kaistanleveyden tulee olla riittävä, ja uusien solmujen lisäämisen ei tulisi vaatia kokonaan uutta verkkoa. Kapasiteetin hallinnan tulisikin olla oma tehtävänsä, joka ei liity uuden sovelluksen lisäämiseen.[21, s. 205]

Valtioneuvoston tilaamassa raportissa[22] yhteiskunnan varautumisesta kriiseihin nostetaan esiin myös sähkönjakelun häiriö, jonka syy on tuntematon. Tällainen häiriötilanne voi kohdistua myös jakeluverkkoon, ja se voi johtua esimerkiksi kyberhyökkäyksestä tasemarkkinoin, tai sähköverkon ja tietoliikenneverkon tunnistamattomasta keskinäisvaikutuksesta. Raportti ei vielä huomioi mahdollista kehitystä sähkönjakelun kysyntäjoukon tietoliikenteen osalta, mutta teoriassa voisi olla mahdollista, että häiritsemällä sähkönjakelun kysyntäjoukon tietoliikennettä aiheutetaan jakeluverkon häiriö. Vastaavasti voi myös käydä niin, että sähkönjakelun häiriön myötä kysyntäjoukon tietoliikennetä joutuu korjaamaan. Tällaiset ristiriippuvuustilanteet voivat olla hankalia selvittää jälkikäteen, ja niihin tulisikin varautua myös kysyntäjoukon tietoliikenteen osalta ajoissa.

Esimerkiksi AMI-järjestelmään toteutettu viestiverkko on täysin sähkönjakeluyhtiön omistama. Mutta erillisen tietoliikenteen palveluntarjoajan hyödyntämisessä on myös etuja, jotka eivät puolla kysyntäjoukon aggregaattorin oman verkon rakentamista. Olemassaolevan järjestelmän käyttö ei ensinnäkään sido enää uutta pääomaa aggregaattorilta uuden verkon rakentamiseen. Olemassaolevaa verkkoa pääsee myös hyödyntämään nopeasti. Eri palveluntarjoajien välinen kilpailu voi myös laskea tiedonsiirron kokonaiskustannuksia, ja jos palveluntarjoaja päivittää usein verkkonsa tekniikkaa, voi aggregaattorillekin mahdollistua uusia ominaisuuksia

nopeammin verrattuna siihen, että aggregaattori käyttää omaa verkkoaan. Verkkopalveluntarjoajalla on myös todennäköisemmin asiantuntemusta tietoliikennetekniikasta, toisin kuin kysyntäjoustoon erikoistuneella palveluntarjoajalla. Etenkin langattomien tekniikoiden osalta on lisäksi usein niin, ettei verkkotoimilupa helmiä kysynnänjouston aggregaattorille, jolloin palveluntarjoajan hyödyntäminen on pakollista.[21, s. 261–262]

4.2 AMI-järjestelmä

Älykkään sähköverkon perusedellytys on tihein aikavälein toteutettu sähkönkulutusmittarin luenta (AMR). Jotta lukemista olisi hyötyä, pitää ne siirtää jotenkin kulutuspisteestä keskustietokantaan, ja tätä tietoverkkoa kutsutaan Advanced Metering Infrastructureksi (AMI). Vaikka AMI-verkko voisi taipua moniin älykkään verkon sovelluksiin, moni jakeluverkkoyhtiö käyttää sitä ensisijaisesti vain AMR-luentaan.[21, s. 111–112] Suomessa piti olla vuoden 2013 loppuun mennessä asetuksen mukaisesti kaikilla sähkönkäyttöpaikoilla etäluettava sähkömittari, ja tavoitteeseen päästiin. Sähkönkulutuksen etäluennassa Suomi onkin edelläkävijämaita[1, s. 20].

AMI-järjestelmän toteutus nojaa kahteen tapaan yhdistää mittalaitteet taustajärjestelmään: joko mittari on suoraan IP-yhteyden avulla yhteydessä keskustietokantaan, tai sitten ryhmä mittareita kommunikoi lähialueverkon yli ns. keskittimen (data concentrator) kanssa, joka on yhteydessä keskustietokantaan. Keskitin voi olla erillinen laite tai yksittäinen mittari. Lähialueverkko on useimmiten toteutettu lisensivapaan radioyhteyden yli (RF mesh, useimmiten 900 MHz:in taajuusalueella), tai voimajohto-kantoaaltotiedonsiirtona (Power Line Communication over narrowband frequencies, PLC-NB). Lähialueverkon toteutus voi olla jopa valmistajakohtainen ratkaisu, jota muut valmistajat eivät välttämättä saa käyttää ilman lisenssimaksua.[21, s. 113–114]

DR-poolin loppuraportissa oletetaan, että kotitalouksien kuormanohjaus voisi tapahtua AMR-mittarin ohjausreleen avulla[1, s. 101]. Kuitenkin, jos tarkastellaan Networked Energy Servicesin (NES, aiemmin Echelon) kolmivaiheisen mittarin esitettä[23], joka on havainnollistettu kuvassa 3, huomataan esitteen lupaavan 4–8 tariffia 10 päiväkohtaisella hintatason vaihdolla, mittarin ohjelmistoversiosta riippuen. Näillä tiedoin ei voida varmuudella sanoa, että mittari soveltuisi kappaleessa 3.1 esiteltyihin ohjauskuvioihin, jotka edellyttäisivät päivittäistä ja ehkä jopa tuntikohtaista profiilinvaihdosta. Vastaavilla ominaisuuksilla varustettuja mittareita on Suomessa huomattavan paljon.

4.3 Ohjaus Internetin yli

Asioiden Internetin (IoT, Internet of Things) yleistyessä myös kotitalouksien etäohjauksen tiedonsiirtokanavana on yleistymässä Internet ja IP-pohjainen liikenne. Internet sallii luontaisesti kaksisuuntaisen yhteyden, ja nykyaikaiset laajakaistayhteydet sallivat huomattavien tietomäärien siirron, jolloin pienet ohjauskäskyt soljuvat tietovirrassa vaivattomasti, jättäen tilaa esimerkiksi automaattioratkaisun muulle datalle. Kaapeloitu ja langaton laajakaistainen yhteys löytyy lähes kaikkialta Suomesta.



Kuva 3: NES:n kolmivaiheinen etäluettava sähkönkulutusmittari.[24]

IP-osoitteen avulla kukin kuorma on helppo yksilöidä ja jopa paikallistaa.

Jotta kotitalouden sovellukset voivat käyttää Internetiä, pitää kotitalouden olla Internetin tilaaja. Toistaiseksi tämä ei ole haitannut kotiautomaatiota tilanneita kotitalouksia, mutta eteen voi tulla tilanne, jossa kuluttaja kyseenalaistaa kysyntäjoustoaggregaattorin tiedonsiirron maksutta kuluttajan omaa liittymää pitkin. Haittoja Internetin hyödyntämisen kannalta ovat myös laajakaistaverkon heikompi kattavuus taajamien ulkopuolella (sekä kaapeloituna että langattomana), ja riippuvuus teleoperaattorin järjestelmien toiminnasta. Yhteyshäiriöt voivat myös kostautua latenssina ohjauskäskyjen välittämisessä. Tosin There Corporationin kysyntäjoustopilottiprojektissa mitattu ohjauskäskyjen viive 2,3 s aiheutui lähes täysin kotitalouden sisällä tapahtuneesta keskusyksikön ja ohjauslaitteen langattomasta kommunikoinnista, ja Internetistä aiheutunut siirtoviive oli lähes mitätön[19].

4.4 Langaton viestiliikenne

Radiotaajuuksilla toteutettu siirtotie voi sallia koko maan kattavan yhdensuuntaisen tiedonsiirtotien, ilman kiinteän verkon investointeja, kysyntäjoustopilottorin tai useamman aggregaattorin yhteisille ohjauskäskyille. Tutkimuksessa perehdyttiin tarkemmin kahteen mahdollisuuteen Suomessa toteuttaa langaton vaihtoehto.

4.4.1 DVB-televisiotaajuuudet

Digitaalisen liiketoiminnan kehitysjohtaja Vesa Erkkilä kertoi haastattelussa[25], että esimerkiksi ääniradion kautta tuskin on Suomessa toteutettavissa sähkön kysyntäjoustopilottorin ohjauskäskyjen siirtoa. FM-radiotaajuuksilla teknologia tukee pienimuotoista tiedonsiirtoa korkeintaan 16 kbit/s siirtonopeudella (DARC, Data Radio Channel), eikä digitaalista ääniradiota (DAB), jossa voisi siirtää dataakin, Suomeen todennäköisesti tule. Myös Radiotekniikan perusteiden oppikirjassa[26, s. 229] kerrotaan,

että DAB-lähetykset keskeytettiin vuonna 2005 vastaanottimien hitaan yleistymisen takia. Sen sijaan digitelevisioiden verkosta, tarkkaan ottaen DVB-T2:sta, voisi löytyä riittävä tiedonsiirtokapasiteetti.

Koko Suomen kattavat televisiolähetykset voidaan toteuttaa 40 lähetysasemalla, täällä käytetyillä antennimaston korkeuksilla. TV-lähetysten polarisaatio on vaakapolarisaatio, ja Lapissa käytetään radiolähetyksissä myös ympyräpolarisaatiota. Yleisradion kanavanipun väestöpeitoksi on näillä keinoin saatu yli 99,9 %.[26, s. 229] Erkkilä sanoi haastattelussa[25], että televisioverkon luotettavuus voi Digitalla paikoin olla jopa 99,98 %.

DVB-T2-lähetys voisi siis toimia kaikki kotitaloudet kattavana ohjauskäskyjen siirtotienä. On myös turvallista olettaa, että esimerkiksi jokaisella sähköistetyllä loma-asunnolla on televisioantenni. Erkkilä huomautti lisäksi haastattelussaan[25], että antennin ylläpito on kuluttajan intressien mukaista, ja että tiedonsiirron varmistamiseksi kysyntäjoustoaggregaattorin siirtokäskyille voidaan käyttää toisenlaista modulaatiota kuin televisiolähetysille. Näin ollen siirtotien kattavuus ja toimintavarmuus voidaan laadullisesti arvioida hyviksi.

Toistaiseksi puuttuu kuitenkin toimiva ohjauskäskyjen vastaanotinyksikkö. Tämä vaatisi joka tapauksessa jonkinlaisen antennipistokkeeseen liitetyn keskusyksikön, joka sitten välittää ohjauskäskyn eteenpäin ohjausreille tai termostaatille. Lisäksi DVB-T2:n hyödyntäminen johtaa riippuvuuteen verkko-operaattorista, kuten Digitasta tai markkinatulokas Norkring As:stä.

4.4.2 LoRaWAN

LoRaWAN on LoRa Alliancen ylläpitämä, lisenssivapaita radiotaajuuksia hyödyntävä teknologia, jonka tarkoituksena on mahdollistaa lukuisten, vähävirtaisten anturien liittyminen Internetiin langattomasti ja tietoturvalisäisesti. Teknologian fyysinen kerros eli LoRa perustuu hajaspektritekniikkaan, joka vaatii vain vähän tehoa, mutta mahdollistaa silti pitkän välimatkan anturin ja tukiaseman välillä. Yksi tukiasema voikin parhaimmillaan kattaa kokonaisen kaupungin, ympäristön esteistä riippuen. LoRaWAN:in verkkoarkkitehtuuri perustuu tähtitopologiaan, ja yhdessä verkon solmujen asynkronisuuden kanssa tämä tarkoittaa tehon säästämistä viestinnässä. Yksittäiset verkon solmut eivät liity yhteen määrättyyn tukiasemaan, vaan kaikki kantaman sisällä olevat tukiasemat vastaanottavat solmulta saman viestin. LoRaWAN-verkon suuri kapasiteetti saavutetaan mukautuvalla tiedonsiirtonopeudella, ja tietoturva on toteutettu verkko- ja sovellustason salauksilla.[27]

LoRaWAN mahdollistaa myös kaksisuuntaisen viestiliikenteen, ja erinomaisten kuuluvuusominaisuuksien vuoksi LoRaWAN vaikuttaisi hyvältä tavalta ohjauskäskyjen välittämiseksi kotitalouksien kuormille. Suomessa Espotel ja Digita markkinoivat yhdessä LoRaWAN:ia teollisen Internetin ja anturien viestintäalustaksi: Digita on vastuussa verkon rakentamisesta ja operoinnista, ja Espotel tarjoaa verkkoa käyttäville asiakkaille tuote- ja palveluratkaisuja.

Espotelin kehitysjohtaja Jaakko Ala-Paavola totesi haastattelussa[28], että LoRaWAN on parhaimmillaan tapauksissa, joissa tiedonsiirtokustannukset verkon yli kasvaisivat lineaarisesti laitemäärän suhteen, ja paikoissa joissa ei voi käyttää muita

tiedonsiirtotapoja, kuten matkapuhelinverkkoa tai PLC:tä. Ala-Paavola myös kertoi, että toistaiseksi LoRaWAN-tukiasemia on Suomessa kourallinen, ja että maanlaajuisen, julkisen LoRaWAN-verkon toteutuminen näyttää epätodennäköiseltä, koska julkista kysyntää sille ei vielä ole. Näiden seikkojen takia LoRaWAN:ia tarjotaan ensisijaisesti teollisuuslaitoksille. Ala-Paavola mainitsi myös, että esimerkiksi Saksassa on E.Onin omistama LoRaWAN-verkko Digimondo, jota käytetään muun muassa sähkönkulutusmittarien etäluentaan.

Myöhemmin haastattelussa[25] Digitan liiketoiminnan kehitysjohtajan Vesa Erkkilän kanssa selvisi, ettei LoRaWAN välttämättä soveltuisi ohjauskäskyjen välittämiseen haja-asutusalueille, koska etäisyyden takia ohjauskäskyjä vastaanottava laitteisto tarvitsisi sittenkin oman antennin tähän tarkoitukseen. Erkkilä kuitenkin huomautti, että jos ohjauskäskyjen tiedonsiirto tapahtuu kappaleessa [4.4.1](#) kuvatulla DVB-järjestelmällä, voitaisiin paluukanava mahdollisesti toteuttaa LoRaWAN:in kautta. LoRaWAN:in laajentumiselle ei silti toistaiseksi ole aikataulua, ennen kuin kysyntä teknologialle lisääntyy.

5 Kotitalouksien älykkäät laitteet

Toinen puoli tutkimuksesta keskittyi selvittämään, millaisia etäohjattavia sähkölämmitysratkaisuja suomalaisiin kotitalouksiin on tuotu ja on mahdollista tuoda. Tutkimussuunnitelman mukaisena tavoitteena oli erityisesti selvittää, voisiko kotitalouksien kysyntäjousto toteuttaa termostaatin asettelulämpötilan ohjauksella. Tätä varten kappaleessa pohdittiin myös, voisiko Suomeen tuoda Pohjois-Amerikassa suosittuja ohjelmoitavia termostaatteja.

Kappaleessa 3.5 asetettiin vaatimukset kysyntäjouston kotitaloudessa mahdollistavalle laitteistolle: laitteiston tulee tukea kunkin kysyntäjoustoaggregaattorin valitsemää tiedonsiirtotapaa, ja mieluiten mahdollistaa myös asiakkuuden siirto (sekä kysyntäjoustoan osallistumisen että sähkön ostamisen osalta) kilpailijalle; laitteiston pitäisi tukea monipuolisesti eri sähkölämmitystapoja, ja mieluiten myös lämpötilan pudotustoimintoa, ja sen tulee pyrkiä jälkihuipun minimointiin; tietoturvallisuuden tulee olla ajantasalla; mahdollisuus asettaa asiakaskohtaiset rajat lämpötilan vaihtelulle; mahdollisuus mitata huonelämpötilaa ja lähettää mittausdata aggregaattorille lämpötilakäyttäjätymisen mallintamiseksi; laitteiston tuki muille kodin älylaitteille; ja laitteiston pitää olla käyttäjäystävällinen. Tutkimuksessa huomattiin, että nykyisin tarjolla olevat ratkaisut eivät huomioi kaikkia asetettuja vaatimuksia.

Ensin luodaan katsaus siihen, millaisia sähkölämmityskuormia Suomen kotitalouksissa voisi olla ohjattavana, ja että voisiko näiden kytkentätapaa sähköpääkeskuksessa hyödyntää laajamittaisen kysyntäjouston toteuttamisessa. Erilaiset kotiautomaatio-ratkaisut ovat yleistyneet, ja näiden käyttökelpoisuutta tarkastellaan kysyntäjouston kannalta. Kunkin ratkaisun kohdalla tarkastellaan myös jo asennetun kotiautomaation muokkaamista kysyntäjouston tarpeisiin, jotta säästettäisiin uuden tekniikan asennuskustannuksissa. Lisäksi selvitetään, miten eri automaatiotratkaisut voisivat sopia remonttikohteisiin.

5.1 Sähkölämmitys suomalaisissa kotitalouksissa

Suurin haaste älyn tuomisessa suomalaisiin sähkölämmitteisiin kotitalouksiin piilee siinä, että asennettujen lämmitysjärjestelmien kirjo on verrattaen suuri. Esimerkiksi pelkästään Theren pilottiprojektin raportissa[18] mainitaan mahdollisesti ohjattaviksi kohteiksi omakotitaloja, joissa on suora sähkölämmitys, varaava lattialämmitys, sähkölämmitteinen käyttövesivaraaja, varaava sähkölämmitys, sekä öljylämmitys, jos öljykattilassa on varalla sähkövastus. Tämän lisäksi sähkökäyttöisiä ovat sekä maa- että ilmalämpöpumput. Lämmityslaitteiden termostaatit voivat olla mekaanisia tai elektronisia. Uusimpana toimintona sähkölämmittimissä voi olla lämpötilan pudotustoiminto, jolla voi säästää kodin lämmityskustannuksissa oltaessa pidempään poissa kotoa.

Kuten huomataan, joudutaan tarkastelemaan mahdollisesti suurta määrää keskenään erilaisia laitteita, joiden ohjausmahdollisuudet voivat olla valmistajakohtaisia. Pientä helpotusta tilanteeseen tuo Sähkötietokortiston ohjeistus [29] sähkölämmityksen ohjauksesta ja säädöstä, jossa määritellään vakiokytkennät sähkökeskuksille. Nämä vakiokytkennät ovat perinteisesti mahdollistaneet jakeluverkko-operaattorin

toteuttaman sähkölämmityksen ohjauksen, jonka ensisijaisena motiivina on ollut verkon huipputehon rajoittaminen. Kytkennät pohjautuvat jo vuoden 1992 suositukseen Sähkölaitosyhdistykseltä, ja ne mahdollistivat verkkokäskyohjauslaitteen asentamisen. Nämä VKO-laitteet on nykyään korvattu etäluettavilla sähkönkulutusmittareilla.

Kussakin mallikytkennässä etäluettava sähkönkulutusmittari ohjaa lämmitystä yöaikaan, ja lisäksi mallikohtaisesti voi olla mahdollista valita talvi- tai kesäasento, joka määrää käytettävän termostaatin sekä lämmitysvastukset. Muita eroja ovat mm. ohjauspiirien lukumäärät ja niiden ohjattavuus yhdessä tai erikseen, lämminvesivaraajan ohjaus käsin, automaattisesti tai viivereleellä, sekä mahdollinen kiukaan apurele, joka voi pudottaa suoran sähkölämmityksen pois päältä kiukaan päälläolon ajaksi.[29]

Jos kotitaloudessa on käytetty tämän sähkötietokortin mukaista kytkentää, helpottuu ryhmäkeskuksen kautta toteutettava etäohjaus, kun ohjauslaite voidaan kytkeä suoraan vakiokytkennän releisiin. Vakiokytkentää varten lämmityslaitteet on myös ryhmitelty yhtenäisiksi ryhmiksi, joiden releeksi voidaan vaihtaa kauko-ohjattava rele, ja toteuttaa lämmityksen ohjaus käyttämällä relettä, jälkipiikistä huolimatta. On kuitenkin huomattava, että kytkentäsuosituksesta on käytössä useita erilaisia versioita, riippuen aina kohteesta, keskusvalmistajasta sekä urakoitsijasta. Lisäksi keskusvalmistajille tehdyn kyselyn mukaisesti SLY-kytkennällä varustettujen sähköpääkeskusten määrä on vähenemässä[29]. Tämän perusteella ei siis voida varmuudella luvata, että sähkölämmityksen kytkennät kotitalouksien pää- ja ryhmäkeskuksissa olisivat valmiiksi jonkin tunnetun standardin mukaisia.

Sähkötietokortti kertoo myös, että lämpötilaa poissaolon aikana pudottava kotona-poissa-kytkin ei vaadi erillistä kytkentää sähkökeskukseen, vaan ohjaus välitetään kytkimeltä suoraan vaiheohjauksella ohjattavan laitteen termostaatille.[29] Jos kysyntäjoustojärjestelmällä halutaan siis käyttää lämpötilan pudotustoimintoa, on signaali johdettava suoraan ohjattavalle lämmityslaitteelle. Tämä tarkoittaa myös sitä, että ohjausmahdollisuudet pääkeskuksesta kattavat vain päälle- ja poiskytkennän sähkölämmitykselle, jolloin jälkipiikin suuruuteen ei voida vaikuttaa lämpötilan asettelulla.

5.2 Kotiautomaatiojärjestelmät

Kotiautomaatio on yleistynyt suomalaisissa kotitalouksissa. Cozify Oy:n syksyn 2014 markkinatutkimuksen[30] mukaan 22 % suomalaisista kotitalouksista on jo hankkinut kotiautomaatiota, ja jopa 28,5 % kotitalouksista aikoi ostaa jotain kotiautomaatiota vuosien 2014–2016 välisenä aikana. Energianhallintaan keskittyvä automaatio ei tosin ollut ensisijaisena hankintakohteena, vaan turvallisuuteen ja muuhun asumismukavuuteen, kuten valaistuksen ja viihde-elektroniikan ohjaukseen, keskittyvä automaatio menivät etusijalle. Lisäksi yksi keskeisimpiä markkinatutkimuksen tuloksia oli se, että kotiautomaatiota ollaan valmiita hankkimaan sekä kertaostoksena että kuukausittain laskutettavana tuotteena lähes yhtä paljon.

Samaisen markkinatutkimuksen[30] mukaan kotiautomaatiojärjestelmän helpo käyttöönotto ja mahdollisuus asentamiseen itse on tärkein peruste järjestelmän valinnassa. Cozifyn tuote, jota tarkastellaan lähemmin kappaleessa 5.2.4, onkin

suunniteltu mahdollisimman pitkälle kuluttajan itse asennettavaksi. Toisaalta automaattioratkaisun kehittäminen sellaiseksi, että kuluttaja voi asentaa sen itse, rajoittaa hyödynnettävissä olevia automaattioratkaisuja ja niiden soveltamista sähkölämmityksen ohjaamiseen, sillä nykyisten sähkötyömääräysten mukaan sähkölämmitykseen liittyvät työt hoitaa sähköalan ammattihenkilö.

Erilaisia kotiautomaattioratkaisuja on tarjolla useita. Useimmat näistä mahdollistavat sekä kiinteät (johdolliset) että langattomat väyläratkaisut, ja merkittävimmät erot muodostuvat automaation ohjelmoinnin vaatimien tuotteiden lisenssimaksuista. Näin riippuvuus tietystä valmistajasta on voitu saada aikaan näennäisesti avoimien väyläratkaisujen kohdalla. Suljettu ohjelmointirajapinta tai valmistajariippuvuus voivat osaltaan jopa heikentää kysyntäjouoston edistämistä, koska läpinäkyvyys ratkaisun toteuttamisessa ja ohjelmoinnin muutosten toteuttamisen helppous kärsivät. Sekä Cozifyn Antti Vihavaisen haastattelussa[31] että Theren projektijohtaja Ilkka Palolan haastattelussa[19] huomautettiin, että vaativia muutostöitä edellyttävä kotiautomaatiojärjestelmä, jonka uudelleenohjelmointi edellyttää kalliita lisenssimaksullisia lisätuotteita, tuskin tulee merkittävään asemaan esimerkiksi vanhojen rintamamiestalojen energiaremonteissa.

Seuraavaksi tarkastellaan valikoituja kotiautomaattioratkaisuja, ja käydään läpi pari case-esimerkkiä kotiautomaation osalta. Koska jo asennetun kotiautomaation hyödyntäminen sähkön kysyntäjoustopuolella on kiinnostava näkökulma, tarkastellaan valittuja ratkaisuja myös toimintojen lisäämismahdollisuuksien osalta. Valmistajariippuvuuden riskeistä huolimatta oletetaan, että useimmiten kysyntäjouoston lisääminen automaattioratkaisuun ei aiheuta erityistä lisävaivaa.

5.2.1 KNX-protokolla

KNX-protokolla on standardisoitu, OSI-mallin mukainen viestiprotokolla koti- ja rakennusautomaation tarpeisiin. Protokollaa kehittävä ja ylläpitävä KNX Association syntyi, kun KNX:n edeltäjästandardien kattojärjestöt päättivät yhdistyä vastataksien koti- ja rakennusautomaatiotuotteiden kysyntään. Protokollan hajautetulla lähestymistavalla on tarkoitus varmistaa eri valmistajien laitteiden ja eri tiedonsiirtoväylien keskinäinen yhteensopivuus eri valintojen mukaan toteutuissa järjestelmissä. Tämä tarkoittaa myös sitä, että kaksisuuntainen viestintä KNX-verkon päätepisteeltä toiselle onnistuu ilman keskitettyä ohjausta.[32]

KNX-standardi ei ole sidottu vain yhteen tiedonsiirtotapaan. Parikaapelin lisäksi protokolla tukee lisenssivapaita radiotaajuuksia ja voimajohto-kantoaaltotiedonsiirtoa (PLC). Näin esimerkiksi rakennusvaiheessa kaapelilla toteutettuun verkkoon voidaan tulevaisuudessa lisätä uusia osia ilman uusia kaapelivetoja. Monipuoliset vaihtoehdot viestiliikenteen fyysiseksi kerrokseksi tekevät KNX:stä erittäin kiinnostavan ennen kaikkea kysyntäjouoston käytännön toteuttamista ajatellen. Kotiautomaation ohjelmistoa pystyy myös päivittämään etäyhteyden yli.[32]

Vaikka KNX on avoimesti julkaistu standardi, se ei ole lisenssivapaa. Pääasialliset työkalut kehitykseen tulee ostaa KNX:n kattojärjestöltä, eikä KNX-yhteensopivuuden takaavaa logoa saa ilman, että yritys on allianssin sertifioima. Tämä edellyttää myös kehitetyn tuotteen luovuttamista kattojärjestön (kolmannen osapuolen) tarkastetta-

vaksi.[32] Cozifyn liiketoiminnan kehitysjohtaja Antti Vihavaisen haastattelun[31] perusteella KNX voi siksi olla liian raskas pienempimuotoiseen kotiautomaatioon.

ABB toteutti Suomessa KNX-väylää hyödyntämällä ”älykerrostalon” Espoossa vuonna 2013. Vaikkakin kohde on kaukolämmityksen piirissä, sen kiinnostavia ominaisuuksia tutkimuksen kannalta ovat reaaliaikainen, asukaskohtainen sähkönkulutuksen seuranta- ja ohjausjärjestelmä, jonka avulla on myös mahdollista pudottaa huonelämpötilaa pidemmän poissaolon ajaksi. Asennettua järjestelmää pyritään myös kehittämään niin, että asukas pystyy ohjaamaan kodinkoneet toimimaan halvan sähkön tunneilla.[33] Toteutus voisi siis olla soveltuva myös sähkön kysyntäjoustopuolelta, ja sen ehkä pystyisi kopioimaan myös sähkölämmitystaloihin.

Ensto on Suomessa tunnettu myös sähkökäyttöisten lämmityspatterien valmistajana, ja Ensto Intro on yrityksen KNX-pohjainen kotiautomaatiotuote, jonka avulla voi myös etäohjata sähkölämmitystä. Myös lämpötilan pudotustoiminto on käytettävissä, jos taloudessa käytetään yhteensopivia Enston lämmityspattereita. Kodinohjaimen käyttäminen tapahtuu paikallisesti kotona-poissa-painikkeella, ja etänä älypuhelimella. Itse ohjain asennetaan valmiiksi ohjelmoituna ryhmäkeskukseen, ja etäohjaus toteutetaan Internet-yhteyden ylitse.[34] Tuotetta ei voi vuoden 2015 esitteen mukaan hyödyntää kysyntäjoustopuolella markkinoilla, mutta kodinohjaimen ominaisuudet muuten täyttävät kysyntäjoustopuolelle asetetut vaatimukset. Ohjaimen ohjelmoinnin muuttaminen aggregaattorin ohjausjärjestelmään sopivaksi jälkikäteen lienee toteutettavissa.

5.2.2 Modbus-protokolla

Modbus on vuonna 1979 julkaistu OSI-mallin mukainen viestiprotokolla, josta on sittemmin kasvanut *de facto* -standardi teollisuuselektroniikan yhdistämistarpeisiin, eli anturidatan ja ohjauskäskyjen välittämiseen laitteelta toiselle. Protokollaa kehittää ja ylläpitää Modbusin käyttäjien ja valmistajien järjestö, Modbus Organization, jolle Schneider Electric siirsi protokollan oikeudet huhtikuussa 2004. KNX:n tapaan Modbus voi käyttää tiedonsiirron fyysisenä kerroksena sekä erilaisia kaapeleita (Ethernet, PLC) että radiotaajuuksia ja muita langattomia yhteyksiä. Modbusin viestien rakenne on pidetty yksinkertaisena, ja siten monikäyttöisenä.[35]

Toisin kuin KNX, Modbus on avoimesti julkaistu ja lisenssivapaa. Modbusin viestien rakenteen yksinkertaisuus ja Modbusin riippumattomuus tietystä toimittajasta mahdollistaa sen, että ratkaisujen ja ohjelmistojen kehittäminen protokollan pohjalta voi olla halpaa sekä nopeaa. Siksi Modbus voisi olla kiinnostava protokolla kysyntäjoustopuolelta kotiautomaation toteuttamiseen, vaikka sen ensisijainen sovelluskohde on ollut teollisuus.

5.2.3 Z-Wave-protokolla

Poiketen kahdesta edellisestä protokollasta, Z-Wave on täysin langaton, kaksisuuntaiseen mesh-topologiaan pohjautuva viestiprotokolla. Z-Waven standardia hallitsee Z-Wave Alliance, ja itse teknologiaa lisensoi kalifornialainen Sigma Designs. KNX:n tapaisesti kyse ei ole avoimesta standardista, jolle kuka tahansa voi alkaa kehittää laitteita: kehittäjäalustan ostamisen yhteydessä tulee allekirjoittaa lisenssisopimus, jonka

mukaisesti kehitetty kaupallinen tuote tulee luovuttaa sertifioitavaksi tuotteiden yhdessä toimimisen varmistamiseksi.[36]

Z-Wave on tarkoitettu kotitalouksien ja pienyritysten rakennusautomaatiotarpeisiin, ja se käyttää alle gigahertzin taajuuksia, lisenssivapaita radiotaajuuksia. Mesh-topologian ansiosta erillistä ohjaussolmua viestiliikenteelle ei tarvita. Tiedonsiirtonopeus on riittävä ohjausta varten ja salaus sekä osoiteavaruuden laajennettavuus on otettu huomioon. Taaksepäin yhteensopivuus kaikille versioille on luvattu. Tarjolla on yhteensä yli 1500 keskenään yhteensopivaa tuotetta, ja asennettu kanta käsittää 40 miljoonaa Z-Wave-tuotetta.[37]

Esimerkiksi There Corporationin ThereGate-keskusyksikkö (ks. kappale 5.2.5) hyödyntää Z-Wavea viestinnässä ohjattaville laitteille[19]. Näin ollaan välttytty uusien kaapelien vedolta. Tosin mesh-topologian vaikutuksesta RF-signaali ei välttämättä kulje aina optimaalisinta reittiä keskusyksiköltä laitteelle, joten signaalin välittämiseen voi tulla viivettä.

5.2.4 Case: Cozify

Suomalaisen Cozify Oy:n kotiautomaatioratkaisun keskiössä on Cozify Hub -keskusyksikkö, joka on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4: Cozify Hub -keskusyksikkö kotiautomaatiolle.[38]

Keskusyksikkö on yhteydessä Internetiin, jonka välityksellä kotiautomaatiota voi ohjata älypuhelimesta käsin. Kotona keskusyksikkö yhdistää eri laitteisiin, esimerkiksi radio-ohjattaviin pistorasioihin, antureihin, valaistusratkaisuihin ja äänentoistoon muun muassa langattoman lähiverkon, Bluetoothin ja Z-Waven (ks. kpl. 5.2.3) välityksellä. Keskusyksikkö ei siis vaadi uusia, kiinteitä johtoja, ja se tunnistaa automaattisesti kanssaan yhteensopivat kodin tuotteet. Ensisijaisesti Cozifyn tuote

on suunnattu asiakkaille, jotka haluavat ohjata asumismukavuuteen vaikuttavia tekijöitä, kuten valaistusta ja äänentoistoa.[38] Pelkästä keskusyksiköstä ei siis ole hyötyä ilman älypuhelinia ja keskusyksikön kanssa yhteensopivia kodin laitteita.

Haastattelu[31] Cozifyn liiketoiminnan kehitysjohtaja Antti Vihavaisen kanssa toi ilmi, että Cozify Hub eroaa esimerkiksi KNX-automaatiosta siinä, että se on täysin kuluttajan itse asennettavissa. Keskusyksikön kanssa yhteensopivat tuotteet eivät vaadi asentajan työtä, joten sen avulla kotiin saa automaatiota tarvittaessa nopeastikin. Vihavainen kertoi myös, että Cozifyn ajatus on tavoittaa merkittävä asiakaskunta tuotteella, joka ensisijaisesti lisää jokapäiväistä asumismukavuutta. Lisäksi keskusyksikkö sopii kuluttajille, jotka haluavat lisätä kotinsa turvallisuutta erilaisin anturein.

Samaisessa haastattelussa[31] selvisi myös, ettei Cozify Hubilla toistaiseksi pysty ohjaamaan kodin lämmitystä. Toisaalta sähkölämmitykseen liittyvät asennustyöt Suomessa ovat vain sähköalan ammattilaisten tehtävissä, joten tuote, jonka on tarkoitus olla täysin kuluttajan asennettavissa, ei varsinaisesti osu tälle markkinalle. Vaikka keskusyksikön tekniset ominaisuudet riittäisivätkin, ei sitä voi toistaiseksi hyödyntää kotitalouksien sähkön kysyntäjoustossa.

5.2.5 Case: ThereGate

There Corporationin ja Fingridin kysyntäjoustopilotti on kuvattu kappaleessa 3.7.3. Pilotissa yhteyden kotitalouden ja Theren taustajärjestelmän kanssa loi ThereGate-niminen keskusyksikkö. ThereGate on myös Fortum Fiksu -tuoteperheen keskusyksikkö.

Keskusyksikkö kommunikoi Theren pilvipalveluna toteutetun järjestelmän kanssa Internet-yhteyden ylitse, käyttäen joko kotitalouden omaa laajakaistaa tai 3G-mokkulaa. Tuki esimerkiksi kappaleessa 4.4 kuvatuille radiotaajuuksille on myös tarpeen tullen lisättävissä. Yhteyden luotettavuuden tai nopeuden kannalta tälle ei toistaiseksi ole tarvetta: esimerkiksi kysyntäjoustopilottin tapauksessa kohteet, joilla on heikko kuuluvuus, voidaan jättää pois, ja tiedonsiirrossa suurin viive on aiheutunut vasta kotitalouden päässä Z-Waven takia, eikä suinkaan Internet-yhteyden takia.[19]

ThereGate kommunikoi ensisijaisesti langattomasti kodin älykkäiden laitteiden kautta, käyttäen Z-Wavea (ks. kpl. 5.2.3). Tällä vältetään kiinteästi kaapeloitavan väylän aiheuttamat lisäkustannukset ja -asennustyöt. Laitteessa on myös Mbus-tuki sähkönkulutuslukemien saamiseksi yhteensopivilta sähkönkulutusmittareilta.[19]

ThereGate mahdollistaa sähkölämmityksen etäohjauksen. Kuluttajan käyttöliittymä on Internetissä tai älypuhelimien sovelluksessa, ja näiden välityksellä on mahdollista asettaa ohjausaikatauluja sekä sallittu raja sisätilojen lämpötilanvaihteille. Keskusyksikkö tukee öljykattilan ja muiden keskuslämmitysuunien ohjauksen lisäksi kodin ryhmäkeskukseen sijoitettavaa langatonta relettä, jonka piiriin on kytketty kodin sähkölämmityslaitteet. Releen avulla koko asunnon sähkölämmityspiiriä kytketään päälle ja pois lämmitystarpeen mukaan. Tällöin sähköpatterien termostaattit pitää ennalta asettaa suurimpaan kuluttajan sallimaan huonelämpötilan arvoon. Huoneiston lämpötilaa mitataan langattomien anturien avulla, ja lämpötilatietoa hyödynnetään ohjauksen ajoittamisessa yhdessä sähkömarkkinan hintatiedon kanssa.

Toistaiseksi ThereGate ei tue lämpöpatterien lämpötilan pudotus -toimintoa.[19]

Huomataan, että kuvattu ohjaus voi aiheuttaa jälkihuipun. Normaalitilanteessa, kun sähkölämmitystä ohjataan, jälkihuippu voi jäädä pienemmäksi, koska kiinteistö on kuitenkin lämmitetty sallitun vaihtelualueen ylärajalle. Ei kuitenkaan ole varmaa, millaisia vaikutuksia releen kytkeminen voi aiheuttaa, jos lämmitys on pidempään pois päältä, tai jos esimerkiksi iso määrä, esimerkiksi tuhat, kulutuspaikkaa kytketään samanaikaisesti takaisin päälle.

Yhteenvetona voidaan todeta, että kotitalouksien kysyntäjouston saralla ThereGate vaikuttaa olevan pisimmälle Suomessa kehitetty tekninen ratkaisu. Sekään ei kuitenkaan täytä kaikkia kotitalouden laitteistolle asetettuja vaatimuksia lämpötilan pudotuksen ja jälkihuipun osalta.

5.3 Etäohjattavat termostaatit

Kotiautomaation osalta todettiin, että kuluttajaa kiinnostaa älyn lisääminen kotiin-
sa ensisijaisesti mahdollisimman helposti ja omatoimisesti. Näin ollen esimerkiksi huonetermostaatin vaihtaminen älykkäämpään malliin voisi mahdollisesti olla työ, jonka kuluttaja itse voisi tehdä. Pohjois-Amerikassa tämä on toisaalta mahdollista, ja erilaisia älykkäitä termostaatteja on siellä tullut markkinoille.

Etäohjattavat termostaatit päätettiin käsitellä kotiautomaatiosta erikseen, sillä vaikka ne tietystä näkökulmasta ovat kotiautomaatiota, ovat ne itsenäisesti kehittyneet laitteina erittäin pitkälle Pohjois-Amerikassa. Toisekseen, pohjois-amerikkalaisten etäohjattavien termostaattien käyttämä ohjauspiiri on täysin omanlaisensa, jota ei sellaisenaan löydy Suomesta.

Pohjois-amerikkalaisten kotitalouksien lämmitys perustuu usein keskuslämmitysjärjestelmään, jossa lämmönlähteenä toimii useimmiten kellarissa sijaitseva uuni. Uunin toimintaa ohjataan yhdellä asuintiloissa sijaitsevalla termostaatilla (oletettavasti ns. lakitermostaatti), jolla voidaan ohjata myös ilmanvaihtoa haluttaessa. Lämmityksen ja ilmanvaihdon ohjauspiiri on ohjelmoitavien termostaattien tapauksessa useimmiten 24 voltin vaihtojännitteellä toimiva piiri. Piirin johtojen väritys on useimmiten sama valmistajasta riippumatta, mutta tästä huolimatta johtojen väritystä ei ole standardoitu[39]. 24 voltin jännitteellä toimiva ohjauspiiri mahdollistaa myös sen, että kuluttaja voi itse vaihtaa kotinsa termostaatin uuteen, ilman sähköasentajan apua.

Varmaa on vain se, että ohjauspiirin johtojen väritystä ei ole standardoitu. Vaikuttaa erittäin hankalalta sanoa, sopisivatko Pohjois-Amerikassa suositut ohjelmoitavat termostaatit käyttöön suomalaisissa kotitalouksissa. Toisaalta Suomessa on tarjolla sähkölämmittimiä, jotka voivat toimia huonetermostaatin ohjaamina ns. orjapattereina, unohtamatta lämmitysratkaisuja, jotka perustuvat lämmityskattilaan. Tällöin jokin seuraavaksi esitelty ohjelmoitava termostaatti voitaisiin muokata Suomeen yhteensopivaksi.

5.3.1 Nest

Yhdysvalloissa Googlen ostama Nest Labs Inc. markkinoi ohjelmoitavaa termostaattia, joka on herättänyt huomiota Euroopassakin. Nestin termostaatti, josta on markkinointikuva kuvassa 5, oppii kuluttajan haluaman lämmitysaikataulun seuraamalla kuluttajan tekemiä säätöjä. Termostaatti soveltuu sähkö-, vesikierto-, kaasuja öljylämmityksen ohjaukseen, ainakin jos ohjauspiirinä on käytetty kappaleessa 5.3 kuvattua 24 voltin vaihtosähköpiiriä. Tällöin termostaatin voi vaihtaa jopa kuluttaja itse. Lisäksi termostaatilla voi ohjata myös lämminvesivaraajia.[40]



Kuva 5: Nestin kolmannen sukupolven termostaatti.[41]

Nestin termostaatista tekee erityisen mahdollisuus ohjaukseen kännykällä Internetin yli. Näin termostaattia voi ohjata etäyhteydelläkin. Termostaatti voi myös säätää lämmityksen pois päältä automaattisesti seuraamalla puhelimen paikkatietoa. Lisäksi termostaatille voi ohjelmoida eri lämpötila-asetuksia eri päivänajoja ja loma-aikoja varten. Muita termostaatin ominaisuuksia ovat säätilan seuranta ja lämmityksen sopeuttaminen sääennusteeseen, kuluneen energian näyttö, ja hälytys liian korkeasta tai matalasta lämpötilasta.[40] Nestin termostaatti on kehittymässä täysipainoiseksi kotiautomaatiotuotteeksi, sillä sille on jo saatavilla myös savuhälytys- ja kameravalvontajärjestelmä lisäosina.

Nestin avulla amerikkalainen kuluttaja voi myös osallistua sähkön kysyntäjousto- on, Rush Hour Rewards -ohjelman kautta. Jos kuluttajan käyttämä sähköyhtiö on ohjelmassa mukana, kuluttajan tarvitsee vain ilmoittautua Internetissä ohjelmaan

mukaan. Tämän jälkeen termostaatti hoitaa sähköyhtiön pyytämät lämmitys- tai ilmanvaihtojärjestelmän tehojen alassäädöt automaattisesti, ja sähköyhtiö korvaa käyttämättömän tehon kuluttajalle rahallisesti.[42]

Vuoden 2015 lopulla Nest aloitti termostaattinsa maahantuonnin Iso-Britanniaan, Ranskaan, Alankomaihin, Belgiaan ja Irlantiin. Muiden päivitettyjen ominaisuuksien ohella termostaatti tukee erityisesti eurooppalaisten lämminvesivaraajien ohjausta, mm. OpenTherm-standardin kautta, ja monia muita kodin älykkäitä laitteita, kuten valaistusta. Termostaatti ei kuitenkaan ole kuluttajan itse asennettavissa, vaan suurjännitteisen ohjauksen takia asennustyön tulee tekemään sähköalan ammattilainen.[43]

Vaikuttaa siis siltä, että Nestillä on onnistuttu sovittamaan termostaatti myös eurooppalaisiin kotitalouksien sähköasennuksiin sopivaksi, mutta tämä ei vielä anna yksikäsitteistä vastausta sille, sopiiko Nestin termostaatti suomalaisiin kotitalouksiin. Esimerkiksi tutkimusraportin[44] pohjalta Hollannissa tutkimuksen piiriin kuuluneiden kotitalouksien lämmönlähteeksi on oletettu keskuslämmityskattila.

5.3.2 Wiser Air

Schneider Electricin uuden sukupolven älytermostaatti on nimeltään Wiser Air, joka on havainnollistettu kuvassa 6. Wiser Air on hyvin samankaltainen tuote Nestin kanssa: se oppii automaattisesti kuluttajan haluaman lämmitysprofiilin, ja se on ohjattavissa älypuhelimella Internet-yhteyden yli. Wiser Airin oma ominaisuus on Schneiderin sääennustejärjestelmän hyödyntäminen. Wiser Air mukauttaa lämmityksen ohjausaikataulun kulloinkin vallitsevaan sääennusteeseen sääpalvelun avulla.[45]



Kuva 6: Wiser Air -termostaatti valkoisella etukannella.[46]

Kuluttaja voi hankkia Wiser Airin paitsi itse vähittäismyyjältä, myös amerikkalaiselta sähköyhtiöltä, joka hyödyntää Schneiderin tuotteita kysyntäjoustostrategias-

saan.[45] Siinä missä Nestin tuote on täysin sidottu valmistajansa järjestelmiin, Schneider pyrkii toimittamaan Wiser Airin ja sen taustajärjestelmän täysin sähköyhtiön itse käytettäväksi.

Wiser Airilla voi ohjata sähkö-, vesikierto-, kaasu- ja öljylämmitysjärjestelmiä, ja se on suunniteltu kytkettäväksi 24 voltin ohjausjärjestelmään. Termostaatin asennuksen voi siis suorittaa myös kuluttaja itse.[47] Wiser Airista ei toistaiseksi löydy viitteitä siitä, miten hyvin se voisi sopia Suomessa muihin kuin keskuslämmitteisiin kotitalouksiin.

Haastattelussa[48] Schneider Electricin Healthcare-jaoksen johtaja Antti Paulanteen kanssa tuli ilmi, että toistaiseksi Wiser Airia ei aiota tuoda Suomeen.

6 Tutkimuksen tulokset

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kotitalouksien mahdollisuuksia osallistua sähkönkulutuksen kysyntäjoukseen. Aiemman tutkimuksen perusteella pystyttiin osoittamaan, että kotitalouksien kysyntäjoukon toteuttaminen sähkölämmityskuormien osalta voi tasapainottaa energiajärjestelmän toimintaa. Sähkön kysyntäjoukseen on tarjolla useita sopivia markkinoita, mutta kysyntäjoukon kannattavuus markkinoilta saadun hintatiedon ja niiden pohjalta tehdyn mallinnuksen perusteella on vielä epävarma tai jopa vaatimaton. Haastattelut eri tahojen kanssa toivat ilmi kotitalouksien sähkön kysyntäjoukosta yleisesti vallitsevan näkemyksen, että markkinat eivät ole vielä kypsiä sille. Fingridin olisi kuitenkin mahdollista maksaa enemmän korvausta kysyntäjoukseen osallistuville, jos samalla voidaan säästää uusien tehoreservien rakentamisesta. Sen sijaan kysyntäjoukseen osallistumattomalle kuluttajalle ei voida antaa sanktioita Euroopan komission tiedonannon mukaan, joten pääkeinot kysyntäjoukon edistämiseksi ovat valistaminen ja positiivinen rahallinen kannustin.

Lämmityskuormien osallistumisessa kysyntäjoukseen on haasteellista kuorman mahdollinen ajoittuminen eri aikaan päivästä kuin huippukysyntä on, ja kuorman määrän vaihtelu vuodenaikojen takia: lämmityskauden ulkopuolella aktiivista sähkölämmityskuormaa on luonnollisesti vähemmän. Kuorman täsmällistä määrää on myös vaikea arvioida valtakunnan tasolla.

Myös standardointityö kysyntäjoukon järjestelmien ja laitteiden osalta vaikuttaa olevan vielä kesken. Lisäksi maailmanlaajuisesti ei olla keskittymässä yhteen standardiin, vaan amerikkalaiset ja eurooppalaiset valmistelevat osittain keskenään kilpailevia standardeja kysyntäjoukkoa varten.

6.1 Viestiverkot ohjauskäskyille

Tutkimuksen ensimmäisen osan tavoitteena oli selvittää, onko jo olemassa käyttövalmiina tapa välittää ohjauskäskyjä yksittäisille lämmityskuormille tunneittain tai jopa pienemmällä aikaskaalalla. Mitä useammalle kysyntäjoukon markkinalle kotitalouden kuormaa haluaa tarjota, sitä nopeampi ohjaus tiedonsiirtotien tulee sallia. Pelkkä hidas tai nopea ohjaus ei tule olemaan ainoa kotitalouksien kysyntäjoukon muoto, vaan kysyntäjoukkoa toteutetaan kummallakin tavalla.

Tiedonsiirron saralta myös sähkönkulutusmittarien etäluennan AMI-järjestelmiä tarkasteltiin yleisellä tasolla, mutta tutkimuksen varsinaisena tavoitteena oli löytää AMI-infrastruktuurille vaihtoehtoisia viestiverkkoja. Nopean katsauksen perusteella vaikutti myös epäselvältä, sopivatko Suomessa käytössä olevat etäluettavat sähkönkulutusmittarit sellaisenaan kysyntäjoukon viestiverkon solmuiksi.

Kunkin viestiverkon kohdalla pätevät samanlaiset turvallisuus- ja luotettavuusvaatimukset, kun on kyse sähköjärjestelmän viestiliikenteestä. Samalla tavoin kaikilla verkoilla on oma ”ristiriskinsä” tai ristiinriippuvuus (cross dependency) sähköverkon kanssa: jos sähköverkon ja viestiverkon toiminta riippuvat toisistaan ja jomman kumman toiminnassa on häiriöitä, myös toisen toiminta voi häiriintyä. Tällaiset ristiriippuvuudet sähköjärjestelmän osalta ovat yhä huonosti tunnettuja, joten niitä pitää vakavasti harkita, kun valitaan tiedonsiirtotapaa massiiviselle kotitalouksien

sähkön kysyntäjoustore.

Internet on nykyaikana nousemassa suosituksi tiedonsiirtokanavaksi, kun digitalisaation myötä kotitalouksista tehdään älykkäitä. Toistaiseksi Internet näyttää riittävän hyvältä tiedonsiirtotieltä myös kotitalouksien sähkön kysyntäjoustoren tarpeisiin, eikä Internetistä aiheutuva tiedonsiirron viive ole merkittävä.

Internetiin kytkettyihin laitteisiin voi kuitenkin periaatteessa kuka tahansa päästä, joten myös pelkästään kysyntäjoustoren aggregaattoreille tarkoitettu verkko on kiinnostava. Tällaisen verkon voisi toteuttaa esimerkiksi radiotaajuisena, jolloin on mahdollista saada koko maan kattava tiedonsiirtoverkko. Radiotaajuisesta viestinnästä työssä tarkasteltiin tarkemmin digitelevisiota ja LoRaWAN:ia. Näistä digitelevisiolla olisi mahdollista saavuttaa koko maan kattava, luotettava, yksisuuntainen tiedonsiirtoväylä: ohjauksikäsky ja hintadata saataisiin välitettyä kotitalouksiin ja kesämökeille kautta Suomen, mutta ohjauksen todentaminen ja huonelämpötilan mittaustiedon lähettäminen aggregaattorin järjestelmään eivät tällöin ole mahdollisia. LoRaWAN sen sijaan sallisi kaksisuuntaisen tiedonsiirron, mutta siitä tuskin tulee koko maan kattavaa verkkoa. Taajama-alueilla LoRaWAN voisi silti olla hyödynnettävissä, ja samalla samaa verkkoa voisi tarjota muihinkin asioiden Internetin tarpeisiin. Voi myös olla mahdollista, että LoRaWAN-verkko toimisi paluukanavana sellaiselle aggregaattorin järjestelmälle, jossa ensisijainen tiedonsiirtokanava on digitelevisio.

6.2 Sähkölämmityksen etäohjaus

Tutkimuksen toisen osan tavoitteena oli selvittää, millaisia ratkaisuja on olemassa tai suunnitteilla sähkölämmityksen ohjaukseen, ensisijaisesti termostaatin asetuslämpötilan säätämisen kautta ja toissijaisesti muilla tavoin. Eri valmistajat ovat voineet kehittää laitteilleen erilaisia ratkaisuja etäohjauksen toteuttamiseksi, joten toteutuskohtaiset erot pyrittiin selvittämään. Mahdollisuudet huonekohtaiseen kuormanohjaukseen selvitettiin. Tutkimuksessa pyrittiin myös selvittämään eri ratkaisujen markkinalevinneisyyttä.

Tutkimuksessa pyrittiin myös selvittämään, mitä hyötyjä suoran ohjauksen toteuttamisesta hintasignaaleilla termostaatille on. Kirjallisuustutkimuksen perusteella vaikutti siltä, että lähettämällä pelkkä hintatieto sähkölämmitystä ohjaavalle laitteelle ei juurikaan saada taloudellista hyötyä, vaan suurempi hyöty saadaan, jos kysyntäjoustoren aggregaattori pystyy järjestelmässään toteuttamaan mukautuvaa, ennusteisiin pohjautuvaa tarjousstrategiaa.

Laitekatsauksen tarkoituksena oli myös selvittää, kenen aktiivisuudesta kotitalouksien kysyntäjoustoren edistäminen riippuu. Ongelmana olisi voinut olla, että kotitalouksille ei olisi ollut tarjolla käyttökelpoisia ratkaisuja sähkön kysyntäjoustoren osallistumiseksi. Tutkimuksen perusteella sopivia laitteistoja kyllä on, mutta kotitalouksista kiinnostuneita kysyntäjoustoren aggregaattoreita ei toisaalta vielä ole. Toisaalta kysyntäjoustoren markkinoista selvinneiden asioiden perusteella kotitalouksilla ei ole vielä riittäviä kannustimia kysyntäjoustoren osallistumiseksi.

Vaikka kotitalouksien sähkölämmitysjärjestelmien ohjaukseen on annettu yhteisiä ohjeita jo 1990-luvulta asti, ja viimeisimpänä myös sähkötyökortin muodossa, ei ohjeistusten olemassaolo anna mitään takeita keskimääräisen kotitalouden sähkö-

lämmityskytkentöjen yhtenäisyydestä. Ohjauksen massiivista edistämistä haittaa myös sähkölämmitysjärjestelmien suuri kirjo.

Kotiautomaation osalta selvisi yllättäen, että markkinatutkimuksen perusteella yli 20 % kotitalouksista on jo hankkinut jotain kotiautomaatiota, ja toinen samankokoinen osuus kotitalouksista suunnittelee hankkivansa jotain kotiautomaatiota. Kotiautomaatioratkaisuja löytyy monia erilaisia, ja kuluttajia kiinnostaakin eniten mahdollisimman pitkälti itse asennettavissa oleva tuote. Tämä tosin rajaa sähkölämmityksen ohjauksen pois tällaisesta tuotteesta, sillä Suomessa sähkölämmityskytkentöjä saa tehdä vain sähköalan ammattihenkilö.

Enston Intro-kodinohjain on lähimpänä sellaista automaatiotuotetta, jossa on mahdollista etäohjauksella pudottaa suoraan termostaatilta huoneen lämpötilaa. Kuitenkaan tutkimuksen aikana ei löytynyt viitteitä siitä, että tätä tuotetta hyödynnettäisiin vielä kysyntäjoustossa.

Tutkimuksen aikana löytyi myös Fingridin ja There Corporationin pilottiprojektin raportti. Selvisi, että Theren kotiautomaatiotuote täyttää hyvin pitkälle sähkön kysyntäjoustopon järjestelmille asetetut vaatimukset. Kuitenkin, tämäkään tuote ei ohjaa sähkölämmitystä termostaatin asetuslämpötilaa muuttamalla, eikä tuotteella pystytä ohjaamaan huonekohtaisesti asunnon lämpötilaa.

Tutkimuksen lopuksi selvitettiin myös, soveltuisivatko Pohjois-Amerikan markkinoita varten kehitetyt älytermostaatit Suomen markkinoille. Tutkimukseen valittujen Schneider Electricin ja Nest Labsin älytermostaatit eivät toistaiseksi löydy Suomen markkinoilta. Kummankin yrityksen älytermostaatti on ensisijaisesti kehitetty ohjaamaan keskuslämmityskattilaa, joten ne voisivat sopia sellaisenaan vain rajoitettuun määrään suomalaisia kotitalouksia. Kummallakin termostaatilla on monia tutkimuksessa toivottuja ominaisuuksia, mutta jos kumpikin termostaatti on suunniteltu talouden ainoaksi termostaatiksi, ei niillä voi toteuttaa huonekohtaista lämpötilan säätöä.

Laitetutkimuksen lopputuloksena voidaan sanoa, että toivottuja ominaisuuksia kotitalouksien kysyntäjoustopuotteelle löytyy jo monesta eri tuotteesta, mutta yksikään ei täysin täytä tässä työssä asetettuja optimivaatimuksia.

7 Johtopäätökset

Kotitalouksien sähkön kysyntäjousto on vielä melko tuntematon aihe yleisölle, mutta siitä on tulossa jo muutaman vuoden sisällä Suomen sähköjärjestelmän tasapainon ja kestävyys takaaja. Markkinoilta puuttuu vielä kysyntäjoustop aggregaattorit, mutta pilottihankkeita tältäkin saralta on jo käynnissä Suomessa. Tämän työn puitteissa niitä ei ehditty käsitellä. Kotitalouksien kysyntäjoustop tulee arkipäivää sitten, kun aggregaattori pystyy perustelemaan kysyntäjoustop osallistumisesta kuluttajalle koituvan hyödyn sekä valistuksen kannalta että rahallisesti.

Koko Suomi on mahdollista kattaa yhdellä tai useammalla kysyntäjoustop viestiverkolla. Sähköjakeluyritysten AMI-infrastruktuuria pyritään varmasti hyödyntämään kysyntäjoustop, mutta tämän tutkimuksen valossa näyttää epäselvältä, miten hyvin tässä voidaan onnistua nykyisten etäluettavien sähkönkulutusmittarien kanssa.

Internet nousee myös kotitalouksien kysyntäjoustop saralla merkittävään asemaan, ei pelkästään kuluttajalle näkyvien sovellusten kautta vaan myös kysyntäjoustop aggregaattorien ohjauskäskyjen siirtotienä. Radiolinkkien hyödyntäminen kysyntäjoustop, riippuu täysin aggregaattorien mielenkiinnosta langattomaan viestintään, sillä ilman kysyntää ei tule myöskään tarjontaa.

Kaikkia sähkölämmityksen muotoja tukevaa kysyntäjoustop ohjauslaitetta ei tule, vaan sen sijaan on parempi varautua tapauskohtaisesti räätälöitäviin ratkaisuihin. Kotitalouksien ja kesämökkien kohdalla energiaremontin yhteydessä kannattaa harkita kysyntäjoustop järjestelmän tarjoamista. Myös kotitalouksien ostaman muun kotiautomaation hyödyntämistä sähkönkulutuksen kysyntäjoustop, kannattaa tutkia.

Suuri käänne suomalaisessa yhteiskunnassa kohti kotitalouksien sähkön kysyntäjoustop, ei todennäköisesti tapahdu siten, että kaikkiin uudis- ja remonttikohteisiin asennettaisiin kotiautomaatio. Sen sijaan ajan hengen mukaisesti yksittäisten älykkäiden laitteiden, kuten älypatterien ja mahdollisesti älytermostaattien yleistyminen tuo meille todennäköisemmin älykkäät, kysyntäjoustop, osallistuvat kodit, joissa lämpötilaa voi säätää huonekohtaisesti. Amerikan kautta Suomeen rantautuvat älytermostaatit voivat olla tällaisia laitteita, jos ne saadaan yhteensopiviksi suomalaisten kotitalouksien lämmitysjärjestelmien kanssa. Tosin kuvatuunlaisen älylaitteen kehittäminen sähkölämmityksen ohjaamiseksi Suomessa kohtaa haasteita siinä, että muutostöitä sähkölämmitykseen ei saa tehdä kuka tahansa.

7.1 Suositukset kysyntäjoustop edistämiseksi kotitalouksissa

Jotta kotitalouksien sähkön kysyntäjoustop laajamittainen hyödyntäminen olisi mahdollista, tulee kysyntäjoustop aggregaattorien liiketoiminnan mahdolliset jäljellä olevat esteet poistaa mahdollisimman pian.

Kun aggregaattori on saanut liiketoimintansa käyntiin, tulee sen kyetä vakuuttamaan ensisijaisesti valistuksen kautta, että kysyntäjoustop on merkittävä keino taata Suomen sähköjärjestelmän tehokkuus ja toimintakyky tulevaisuudessa, unohtamatta

kuluttajan omaa energiansäästöä. Toissijaisesti rahallisen kannustimen kysyntäjoukseen osallistumiseksi tulee olla riittävä. Kuluttajalta tuskin löytyy valmiiksi laitteistoa ohjauskäskyjen vastaanottamiseen, joten aggregaattorin tulee myös ratkaista, miten kuluttajan laitteisto rahoitetaan: pyytämällä kuluttajalta kertamaksu, pyytämällä kuukausimaksu, vai tarjoamalla kuluttajan laitteisto ilmaiseksi siten, että kysyntäjouksetlla tienattu kannustin maksaa aikanaan laitteiston pois.

Sähköenergiahuollon kehittämisessä pitää yhä vakavammin pohtia sitä vaihtoehtoa, että käytettäisiin uuteen kapasiteetti-investointiin tarvittava raha kysyntäjoukseen osallistuvien kannustimena.

Pientuotannon yleistyessä olisi myös syytä valistaa kuluttajia siitä, että itse tuotettu energia kannattaa käyttää kaikki itse, ja että lopussa energiantarpeessa voi säästää kysyntäjoukseen soveltuvalla laitteistolla. Asentamalla kysyntäjoukseton laitteistoa yhdessä pientuotannon kanssa voidaan saada useampi kotitalous kysyntäjoukseton piiriin, ja kuluttaja voi tällöin minimoida ulkopuolisen sähkön ostonsa.

Kotiautomaatio on yleistynyt Suomessa hyvää vauhtia. Jos kaikki nyt asennettu automaatio voitaisiin tuoda kysyntäjoukseton piiriin, voisi aggregaattorilla olla jo valmiina useita kysyntäjoukseen soveltuvia kohteita, joissa on mahdollista hyödyntää myös lämpötilan pudotustoimintoa. Aggregaattorien kannattaa tehdä yhteistyötä eri kotiautomaatiotoimittajien kanssa.

7.2 Aiheita jatkotutkimukselle

Sähkölämmityksen käyttäytymisen ennustaminen osoittautui vaikeaksi, jos yritetään huomioida huonekohtainen sähkölämmitys, lämpötilan pudotustoiminto tai varaa-va sähkölämmitys. Kysyntäjoukseton laitteistojen valmistajilla on toki omia malleja huoneiston lämpötilakäyttäytymisen ennustamiseksi. Vaikuttaa kuitenkin siltä, että kotitalouden lämpötilamallinnus vaatii vielä tarkempaa tutkimusta.

Jos sähköjärjestelmän ohjaamiseen käytettävä viestiverkko vaatii toimiakseen sähköä, altistutaan toisen järjestelmän häiriö- tai vikatilanteen aikana ristiriskille, joka voi johtaa kummankin järjestelmän kaatumiseen. Sähköverkon ja viestiverkkojen ristiriippuvuudet ja niihin liittyvien riskien tunnistaminen ja eliminointi vaatii lisää tutkimusta.

Tutkimuksen aikana tuli ilmi, että sähkön hinta tai kysyntäjouksetomarkkinoiden tunti hinnat eivät välttämättä ole vielä riittävän korkealla tasolla kotitalouksien kysyntäjoukseton edistämiseksi. Siksi voisi olla aiheutta selvittää, mitä näiden hintojen pitäisi olla, jotta kotitaloudetkin innostuisivat kysyntäjouksetosta. Samalla olisi syytä selvittää, millaiset kysyntäjoukseton kannustinmallit ja laitteiston hankintamallit ovat kotitalouksille mieluisimpia.

Sähkön kysyntäjoukseton standardointityö näytti olevan vielä kesken tämän tutkimuksen aikana. Eri standardien kehittymistä ja niiden mahdollista keskinäistä kilpailua on syytä seurata. On ensisijaista välttää tilanne, jossa otetaan käyttöön myöhemmin katoava standardi tai jonkin toisen standardin kanssa täysin yhteensopimaton standardi.

7.3 Yhteenveto

Kotitalouksien sähkölämmittäjien kuormat otetaan kysyntäjoustopiiriin jo lähitulevaisuudessa, sillä se on lähes välttämätöntä Suomen sähköjärjestelmän tehokkuuden ja toimintakyvyn takaamiseksi tulevaisuudessa. Kuormaa on ohjattavissa merkittävä määrä, ja hyödyntämistä edesauttava teknologia on jo olemassa. Myös kysyntäjoustopilottihankkeita on jo toteutettu useita. Kentältä puuttuvat vielä sähkön kysyntäjoustopilottien aggregaattorit, ja taloudellisen kannustimen riittävyys on epäselvä.

Kotitalouksien erilaiset sähkölämmityskuormat soveltuvat eri markkinoille. Aggregaattorien onkin syytä kehittää järjestelmä, joka osaa ennustaa parhaimman hinnan mahdollisimman hyvin, ja joka noudattaa kehittynyttä tarjousstrategiaa. Kuitenkin, markkinoiden hintojen kehittymisen hitaus voi haitata kysyntäjoustopilottien edistymistä, jos kuluttajien kannustin osallistua kysyntäjoustopilottiin on täysin markkinapohjainen. Pelkän hintakehityksen lisäksi pitäisi harkita kuluttajien valistamista keinoista ylläpitää sähköjärjestelmän tasapainoa, jotta kysyntäjoustopilotti voisi tulla käyttöön nopeammin.

Kotitalouksiin asennettujen sähkölämmitysjärjestelmien kirjo on laaja. Näin ollen pelkkä yksi pakettiratkaisu ei riitä kotitalouksien kysyntäjoustopilottien mahdollistamiseksi. Kotitalouksien huonelämpötilan mallintamiseksi on erilaisia keinoja, mutta absoluuttisen tarkka malli vaikuttaa olevan vielä toteuttamatta. Sähkön kysyntäjoustopilottien aggregaattorien järjestelmä sisältäneen suurimman kysyntäjoustopilottissa käytettävän älyn, mutta yhteensopivuutta edistävä standardityö on jakautunut kahteen haaraan. Aggregaattorien järjestelmälle, viestiyhteydelle ja kotitalouksien etäohjauksen laitteistoille asetettiin tiukkoja vaatimuksia.

Sähkön kysyntäjoustopilottien viestiliikenne aggregaattorien järjestelmän ja kotitalouden välillä on mahdollista toteuttaa usealla eri tavalla. Lisäksi näyttää mahdolliselta valita yksi koko maan kattava viestiverkko kotitalouksien kysyntäjoustopilottiin.

Kauko-ohjattava rele näyttää toistaiseksi lämmityksen poiskytkemisen kannalta nopeimmin toteutettavissa olevalta vaihtoehdolta. Sähkölämmitysjärjestelmien lämpötilan pudotustoimintoa ei vielä osata hyödyntää, ja vaikuttaa siltä, että etäohjattavat termostaatit eivät vie Suomen kotitalouksia kohti sähkön kysyntäjoustopilottiin. Todennäköisemmältä näyttää, että kysyntäjoustopilotti edistyy kotiautomaation kautta. Erilaiset kotiautomaatiojärjestelmät ovat täydennettävissä siten, että niitä käyttävät kotitaloudet voivat osallistua kysyntäjoustopilottiin.

Viitteet

- [1] N. Belonogova, P. Harsia, J. Heljo, S. Honkapuro, M. Honkiniemi, P. Järventausta, K. Kallioharju, K. Lummi, J. Luoma, A. Mutanen, J. Partanen, V. Piikkilä, A. Rautiainen, S. Repo, J. Sorri, A. Supponen, P. Trygg, J. Tuunanen ja P. Valtonen, *Kysynnän jousto — Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkkoyhtiöille (DR pooli). Loppuraportti*. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan laitos, 2015, ISBN: 978-952-15-3485-0.
- [2] J. Elovaara ja L. Haarla, *Sähköverkot I*. Gaudeamus Helsinki University Press, 2011, ISBN: 978-951-672-360-3.
- [3] A. Aalto, N. Honkasalo, P. Järvinen, J. Jääskeläinen, M. Raiko ja A. Sarvaranta, *Mistä lisäjoustoa sähköjärjestelmään? – Loppuraportti*, Espoo: ÅF-Consult Ltd, 2012. url: <http://energia.fi/julkaisut/mista-lisajoustoa-sahkojarjestelmaan>.
- [4] Energiavirasto, *Kertomus sähkön toimitusvarmuudesta 2015*, Helsinki, 9. joulukuuta 2015. url: <https://www.energiavirasto.fi/-/sahkontuotantokapasiteettilaskenut-suomessa> (viitattu 27.01.2016).
- [5] J. Jokiniemi, ”Sähkön kysyntäjoustokohteiden mahdollisuudet Suomen teollisuudessa”, diplomityö, Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu, Energia-tekniikan laitos, Espoo, 2014.
- [6] Fingrid Oyj, *Kysyntäjoustolle soveltuvat markkinapaikat, aktivointien määrät, korvaustasot sekä tekniset vaatimukset*, Helsinki, 2016. url: <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/Kysyntajousto/Markkinapaikat/Sivut/default.aspx> (viitattu 08.04.2016).
- [7] —, *FRR-A:n ylläpito keskeytyy vuoden 2016 alusta*, Helsinki, 2016. url: <http://www.fingrid.fi/fi/ajankohtaista/tiedotteet/Sivut/FRR-An-yll%C3%A4pito-keskeytyy-vuoden-2016-alusta.aspx> (viitattu 12.04.2016).
- [8] —, *Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi*, Helsinki, 2016. url: http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservien_hankinta/taajuusohjattu_kaytto_ja_hairioreservi/Sivut/default.aspx (viitattu 12.04.2016).
- [9] —, *Taajuusohjattujen reservien ylläpidon sovellusohje, Liite 2 Taajuusohjattun käyttö- ja häiriöreservin vuosi- sekä tuntimarkkinasopimukseen*, Helsinki, 1. tammikuuta 2016. url: <http://www.fingrid.fi/fi/voimajarjestelma/voimajarjestelmaliitteet/Reservit/2016/Liite2%20-%20Taajuusohjattujen%20reservien%20yll%C3%A4pidon%20sovellusohje%202016.pdf> (viitattu 13.05.2016).
- [10] J. Ikäheimo, C. Evens ja S. Kärkkäinen, *DER Aggregator business: The Finnish case*, versio Final v. 1.0, Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland, 8. maaliskuuta 2010.

- [11] J. Farin, S. Kärkkäinen ja H. Pihala, *Sähkön kysyntäjouaston potentiaalikartoitus teollisuudessa*, Espoo: VTT Prosessit, 2005. url: http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2005/PR03_P3017_05.pdf.
- [12] L. Handfield, H. Nesreddine ja C. Le Bel, *Power demand of programmable thermostats with built-in pick-up algorithm for electric baseboard heaters*, Lissabon, Portugal: Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Power Systems, syyskuu 2006.
- [13] Euroopan komissio, *Energian kuluttajien aseman vahvistaminen*, COM(2015) 339, tiedonanto, versio final, Bryssel, 15. heinäkuuta 2015.
- [14] A. Raininko, *Kuluttajan aktivointiin tähtäävät toimenpiteet Euroopan sähkömarkkinoilla*, erikoistyö, Espoo: Energiateollisuus ry, Aalto-yliopisto, 2015. url: <http://energia.fi/julkaisut/eun-sahkon-vahittaismarkkinat>.
- [15] Fingrid Oyj, *Tietoa datahubista*, Helsinki, 2016. url: <http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/datahub/tietoa/Sivut/default.aspx> (viitattu 25.04.2016).
- [16] H. Saele ja O. S. Grande, "Demand response from household customers: Experiences from a pilot study in norway", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, s. 102–109, 11 maaliskuu 2011, ISSN: 1949-3053. DOI: [10.1109/TSG.2010.2104165](https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2104165).
- [17] V. Jokinen, "Kiinteistön sähkökuormien markkinahintaperusteinen ohjaus rakennusautomaatiolla", diplomityö, Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu, Rakennustekniikan laitos, Espoo, 2014.
- [18] I. Palola, *Loppuraportti, Kysynnänjouaston pilottiprojekti*, versio 2.0, Vaasa: There Corporation Oy, 15. helmikuuta 2016. url: <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/markkinaliitteet/Kysynt%C3%A4jousto/Kysynna%CC%88njouaston%20pilottiprojekti%20Loppuraportti%20Julkinen.pdf> (viitattu 26.03.2016).
- [19] —, *Project Manager*, Haastattelu, Kuortaneenkatu 2, 00510 Helsinki: There Corporation Oy Ab, 29. huhtikuuta 2016.
- [20] T. Pylvänen, *Solution Architect*, Haastattelu, Sokerilinnantie 11 C, 02600 Espoo: Schneider Electric, 19. huhtikuuta 2016.
- [21] K. C. Budka, J. G. Deshpande ja M. Thottan, *Communication Networks for Smart Grids, Making Smart Grid Real*, sarja 1617-7975. Springer London, 2014, ISBN: 978-1-4471-6302-2. DOI: [10.1007/978-1-4471-6302-2](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6302-2).
- [22] J. Keränen, R. Molarius, A.-M. Heikkilä, L. Poussa ja J. Partanen, *Varautumisen kehitystarpeet turvallisessa yhteiskunnassa*, Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 12/2016, Teknologian tutkimuskeskus VTT, 2016. url: http://tietokayttoon.fi/documents/10616/2009122/12_Varautumisen+kehitystarpeet+turvallisessa+yhteiskunnassa.pdf/bb4b6c20-173a-451e-8cfa-73c657fc2b70?version=1.0 (viitattu 08.05.2016).

- [23] Networked Energy Services, *Mtr 3000 series iec poly phase smart meters, A proven residential smart meter and powerful grid sensor all-in-one*, esite, 2015. url: http://www.networkedenergy.com/201510_MTR3000.pdf (viitattu 28.04.2016).
- [24] EVB Energie AG. (12. elokuuta 2008). Intelligenter Zähler, Wikimedia Commons, url: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Intelligenter_zaehler-Smart_meter.jpg (viitattu 13.05.2016).
- [25] V. Erkkilä, *Business Development Manager*, Haastattelu, Jämsänkatu 2, 00520 Helsinki: Digita Oy, 23. maaliskuuta 2016.
- [26] A. Räisänen ja A. Lehto, *Radiotekniikan perusteet*. Gaudeamus Helsinki University Press, 2011, ISBN: 978-951-672-367-2.
- [27] LoRa Alliance Technical Marketing Workgroup, *LoRaWAN – What is it?, A technical overview of LoRa and LoRaWAN*, 2015. url: <https://www.lora-alliance.org/portals/0/documents/whitepapers/LoRaWAN101.pdf> (viitattu 20.03.2016).
- [28] J. Ala-Paavola, *Head of Business, IoT*, Haastattelu, Kappelitie 6, 02200 Espoo: Espotel Oy, 11. maaliskuuta 2016.
- [29] Sähkötieto ry, *Sähkölämmityksen ohjaus ja säätö*, ST-ohjeisto 7, 3. uudistettu painos, Espoo: Sähköinfo Oy, 2016, ISBN: 978-952-231-149-8.
- [30] A. Vihavainen, *Markkinatutkimus, syksy 2014, Finland*, taulukoidut tulokset, Linnoitustie 4 B, 02600 Espoo: Cozify Oy, 2014.
- [31] —, *Business Development*, Haastattelu, Linnoitustie 4 B, 02600 Espoo: Cozify Oy, 21. huhtikuuta 2016.
- [32] KNX Association, *KNX System Specifications. Architecture*, 29. marraskuuta 2013. url: <http://www.knx.org/media/docs/downloads/KNX-Standard/Architecture.pdf> (viitattu 11.03.2016).
- [33] H. Satuli. (2013). Älytalossa asutaan puhtaasti plussan puolella, ABB Oy, url: <http://www.abb.fi/cawp/seitp202/a8a699d166ac8a85c1257b7900271f08.aspx> (viitattu 12.05.2016).
- [34] Ensto Finland Oy, *Ensto Intro -kodinohjain*, tuote-esite, Ensio Miettisen katu 2, PL 77, 06101 Porvoo: Ensto Finland Oy, 2015. url: http://www.ensto.com/download/26885_ensto_intro_kodinohjain_nettti.pdf (viitattu 12.04.2016).
- [35] Modbus Organization, Inc., *Modbus application protocol specification*, versio V1.1b3, PO Box 628, Hopkinton, MA 01748, USA: Modbus Organization, Inc., 26. huhtikuuta 2012. url: http://www.modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf (viitattu 12.05.2016).
- [36] Z-Wave Alliance. (2016). Z-Wave For OEMs and Developers, The Z-Wave Alliance, url: <http://z-wavealliance.org/z-wave-oems-developers/> (viitattu 12.05.2016).

- [37] —, (2016). About Z-Wave Technology, The Z-Wave Alliance, url: http://z-wavealliance.org/about_z-wave_technology/ (viitattu 12.05.2016).
- [38] Cozify Oy. (2016). Cozify Hub kotiautomaatio keskusyksikkö, url: <http://www.cozify.fi/collections/cozify-products/products/cozify-hub> (viitattu 12.05.2016).
- [39] Transtronics. (2016). Thermostat signals and wiring, url: https://wiki.xtronics.com/index.php/Thermostat_signals_and_wiring (viitattu 12.05.2016).
- [40] Nest Labs, Inc., *Nest Thermostat Fact sheet*, tuotelehti, 3400 Hillview Ave., Palo Alto, CA 94304, USA, 2016. url: <https://nest.com/downloads/press/documents/nest-thermostat-fact-sheet.pdf> (viitattu 19.03.2016).
- [41] —, (2016). 3rd Gen thermostat lifestyle, url: https://nest.com/downloads/press/product-images/thermostat_lifestyle_5.jpg (viitattu 12.05.2016).
- [42] —, (2016). What is Rush Hour Rewards, url: <https://nest.com/support/article/What-is-Rush-Hour-Rewards> (viitattu 13.05.2016).
- [43] —, (17. marraskuuta 2015). 3rd Generation Nest Learning Thermostat Now Available in Europe, url: <https://nest.com/press/3rd-generation-nest-learning-thermostat-now-available-in-europe/> (viitattu 13.05.2016).
- [44] —, *Nest Learning Thermostat Efficiency Simulation for the Netherlands*, white paper, syyskuu 2014. url: <https://nest.com/downloads/press/documents/efficiency-simulation-white-paper-nl.pdf> (viitattu 19.03.2016).
- [45] Schneider Electric. (2016). Wiser Air – WiFi Smart Thermostat by Schneider Electric, url: <https://www.wiserair.com/> (viitattu 13.05.2016).
- [46] —, (2016). Wiser Air thermostat, white, url: <https://d29zqousbpcm8d.cloudfront.net/wp-content/uploads/2014/11/1.1.0-thermostatWhite2.png> (viitattu 12.05.2016).
- [47] —, *Installation Guide – Wiser Air Thermostat*, asennusopas, 2015. url: <https://www.wiserair.com/wp-content/uploads/2015/07/WiserAir-InstallGuide.pdf> (viitattu 12.05.2016).
- [48] A. Paulanne, *Healthcare Segment Leader*, Haastattelu, Insinöörinkatu 41, 33720 Tampere: Schneider Electric, 14. huhtikuuta 2016.